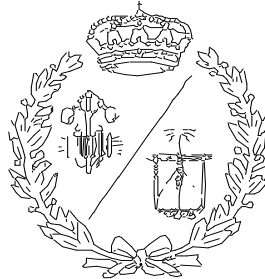


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA EN CARGAS NO LINEALES
AISLADAS Y COMBINADAS EN LOS
RANGOS 0-2 kHz Y 2-9 kHz**

(Measurement and analysis of harmonic
distortion in isolated and combined non-linear
loads in the 0-2 kHz and 2-9 kHz ranges)

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Autor: Kiril Jabier O'Reilly O'Reilly

Septiembre - 2020

A Dios.

A mis padres Liubov O'Reilly y Rolando O'Reilly.

Gracias Dios por tu fidelidad y misericordia.

Con mucho esfuerzo y pasión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi refugio y fortaleza en tiempos de angustia, manantial de vida inagotable. Gloria sea a su nombre.

A mi familia, que han sido mi todo en esta vida. Mi madre que nunca le ha faltado el aliento para darme ánimos, sin ella no sería ni la mitad de lo que hoy soy como persona. Mi padre por su consejo certero, su sabiduría forjada con los años y su ejemplo.

De manera especial a mi director, su constancia y apoyo forman parte de este trabajo, sin él no hubiera llegado a buen puerto esta nave.

A mis amigos que siempre han estado ahí, a veces en la distancia pero presentes.

A mi Jaan un beso.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción.....	1
1.1	Objetivos y estructura del TFM	2
1.2	Breve estado del arte	3
1.3	Cargas lineales y las cargas no lineales	12
1.4	Armónicos. Definición y características	14
1.4.1	Fuentes de armónicos	16
1.4.2	Efectos de los armónicos.....	17
1.5	Interarmónicos. Definición y características	18
1.5.1	Efectos de los interarmónicos	19
1.6	Subarmónicos. Definición y características.....	19
1.6.1	Efectos de los subarmónicos	19
1.7	Distorsión armónica total.....	20
1.7.1	Distorsión armónica total de corriente THDI	20
1.7.2	Distorsión armónica total de voltaje THDV	21
1.8	Normativas sobre armónicos	21
1.8.1	Norma UNE EN 50160	22
1.8.1.1	Campo de aplicación y objeto	22
1.8.1.2	Características de la alimentación en Baja Tensión (BT).....	23
1.8.2	Norma IEEE 519-2014.....	25
1.8.2.1	Límites de distorsión de voltaje	26
1.8.2.2	Límites de distorsión de corriente.....	26
1.8.3	Norma UNE-EN 61000-4-7	27
1.8.3.1	Objeto y campo de aplicación	27
1.8.3.2	Herramienta utilizada para el análisis de las señales.....	28
1.8.3.3	Estructura general del instrumento de medida	29
1.8.3.4	Evaluación de las emisiones de armónicos hasta 2 kHz.....	30
1.8.3.5	Grupo armónico	30
1.8.3.6	Subgrupo armónico	31
1.8.3.7	Subgrupo interarmónico centrado.....	32
1.8.3.8	Grupo interarmónico.....	32
1.8.3.9	Evaluación de las emisiones de armónicos desde 2 kHz hasta 9 kHz	33
1.8.4	Norma UNE-EN 61000-4-30	34
1.8.4.1	Objeto y campo de aplicación	34

1.8.4.2	Organización de las medidas.....	35
1.8.4.3	Parámetros de calidad de suministro.....	35
1.8.5	NORMA UNE-EN 61000-3-2	35
1.8.5.1	Límites de los armónicos para equipos de Clase A y B.....	37
1.8.5.2	Límites de los armónicos para equipos de Clase C.....	37
1.8.5.3	Límites de los armónicos para la Clase D	38
1.9	Referencias del capítulo 1	40
2.	Desarrollo de un instrumento virtual de medida conforme a UNE-EN 61000-4-7	43
2.1	Instrumento de medida de UNE-EN 61000-4-7	43
2.2	Instrumento de medida implementado.....	44
2.3	Sensor y circuito acondicionador de señal.....	44
2.3.1	Sensor de tensión. Transductor LEM LV25-P	44
2.3.2	Sensor de corriente. Transductor LEM LA25-NP.....	45
2.3.3	Fuente de alimentación de los transductores.....	46
2.3.4	Circuito de acondicionamiento para la señal de tensión	47
2.3.5	Circuito de acondicionamiento para la señal de intensidad	49
2.4	Tarjeta de adquisición de datos	51
2.4.1	Velocidad de muestreo	52
2.4.2	Resolución	52
2.4.3	Selección de la tarjeta de adquisición de datos	53
2.5	Instrumento Virtual para procesado y análisis de la Señal	54
2.5.1	Computador	54
2.5.2	Entorno software para desarrollo de instrumentos virtuales.....	55
2.5.3	Cargas Estudiadas.....	64
2.5.3.1	Cargador de móvil	65
2.5.3.2	Monitor de PC de sobremesa.....	65
2.5.3.3	Luminaria.....	66
2.5.4	Base de Datos PANDA	66
2.6	Referencias del capítulo 2	68
3.	Medida y análisis	69
3.1	Descripción de las medidas	69
3.2	Análisis de las medidas tomadas de la señal de la Red de suministro.....	72
3.2.1	Representación de la señal de la red en el dominio tiempo.....	72
3.2.2	Representación de la señal de la red en el dominio de la frecuencia.....	72

3.2.3	Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando parte de la Norma UNE-EN 50160	73
3.2.4	Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2.....	76
3.3	Análisis de las medidas tomadas en las cargas	81
3.3.1	Análisis de las medidas tomadas en la luminaria. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz.....	82
3.3.1.1	Representación de la señal en el dominio del tiempo	82
3.3.1.2	Representación de la señal en el dominio de la frecuencia.....	82
3.3.1.3	Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2	83
3.3.1.4	Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal.....	85
3.3.1.5	Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THDg y THDI	89
3.3.2	Análisis de las medidas tomadas en la Luminaria. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz.....	92
3.3.3	Análisis de las medidas tomadas en el Monitor de PC de sobremesa. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz	94
3.3.3.1	Representación de la señal en el dominio del tiempo	94
3.3.3.2	Representación en el dominio frecuencia.....	94
3.3.3.3	Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2	95
3.3.3.4	Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal.....	97
3.3.3.5	Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THDg y THDI	101
3.3.4	Análisis de las medidas tomadas en el monitor PC de sobremesa. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz.....	102
3.3.5	Análisis de las medidas tomadas en el cargador de móvil. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz	103
3.3.5.1	Representación de la señal en el dominio del tiempo	103
3.3.5.2	Representación en el dominio de la frecuencia aplicando la DFT	103
3.3.5.3	Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2	104
3.3.5.4	Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal.....	106
3.3.5.5	Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THDg y THDI	110

3.3.6	Análisis de las medidas tomadas en el cargador de móvil. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz	111
3.3.7	Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz	112
3.3.7.1	Representación de la señal en el dominio del tiempo	112
3.3.7.2	Representación de la señal en el dominio frecuencia aplicando la DFT	113
3.3.7.3	Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinaciones de equipos Clase C	114
3.3.7.4	Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THDg y THDI	116
3.3.7.5	Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase D	117
3.3.7.6	Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THDg y THDI	119
3.3.8	Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz.....	120
3.4	Referencias del capítulo 3	123
4.	Conclusiones	124
5.	Anexos	134
5.1	Anexo 1 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase C	134
5.2	Anexo 2 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase D	136
5.3	Anexo 3 Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 2KHz a 9KHz	138
5.4	Anexo 4 Hoja de características de la resistencia de medida R_m	139
5.5	Anexo 5 Hoja de características de la Resistencia de medida R_{dis}	142
5.6	Anexo 6 Hoja de características de la resistencia de medida del Transductor de corriente LA 25-NP (IPN = 5-6-8-12-25 At)	145
5.7	Anexo 7 Hoja de características de la resistencia de medida del Transductor de voltaje LV 25-P (V_{pn} = 10..500v)	148
5.8	Anexo 8 Hoja de características de la DAQ NI USB-6210	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diferentes perturbaciones que puede tener el suministro de energía.....	12
Figura 1.2: Carga lineal (capacitor y resistencia en paralelo), Forma de onda de la corriente en la carga	13
Figura 1.3: Ejemplo de circuito con carga no lineal (rectificador de 6 pulsos), la forma de onda de I_{ph1} esta distorsionada con respecto a la señal de alimentación V_{3hp}	14
Figura 1.4: Descomposición de una forma de onda distorsionada.....	15
Podemos representar una señal distorsionada a través de la serie de Fourier de la siguiente manera:	15
Figura 1.5: ilustración de un hueco de tensión y de una interrupción breve del suministro eléctrico. U_n –tensión nominal del sistema (rms). U_a amplitud de la tensión de suministro. $U(rms)$ valor eficaz de la tensión de entrada	25
Figura 1.6: Estructura general del instrumento de medida	30
Figura 1.7- Ilustración de grupos armónicos e interarmónicos	30
Figura 1.8: Líneas espectrales del grupo armónico.....	31
Figura 1.9: Líneas espectrales del subgrupo armónico	31
Figura 1.10: Líneas espectrales del subgrupo interarmónico centrado.....	32
Figura 1.11 Líneas espectrales del grupo interarmónico	32
Figura 1.12: Ilustración de las bandas de frecuencia para las medidas en el margen de 2 kHz a 9 kHz.....	33
Figura 1.13. Cadena de medida.....	35
Figura 1.14: Ilustración del Angulo de fase relativo y parámetros de corriente para valores de potencia ≥ 5 W y menores que ≤ 25 W [3].....	38
Figura 2.1: Estructura general del instrumento de medida según Norma UNE-EN 61000-4-7 ..	43
Figura 2.2. Imagen y esquema de conexión del LEM LV25-P.....	45
Figura 2.3: Imagen y esquema de conexión del LEM LA25-NP	46
Figura 2.4. Fuente de alimentación Philips PE 1542	47
Figura 2.5. Circuito acondicionador de la señal de tensión.	48
Figura 2.6. Montaje de laboratorio del circuito acondicionador de señal.....	49
Figura 2.7: Circuito acondicionador de señal para la medición de la corriente.....	49
Figura 2.9: Montaje de laboratorio del circuito acondicionador de señal de corriente.	51
Figura 2.10: Modelo NI USB-6210.....	54
Figura 2.11: Pin-out de la DAQ 6210	54
Figura 2.12: Panel frontal y diagrama de bloques de un VI.	55
Figura 2.13. Diagrama de bloques del instrumento virtual.	57

Figura 2.14: DAQ Assistant en la paleta de funciones y su interfaz de configuración.	57
Figura 2.15: Configuración del bloque DAQ Assistant.	58
Figura 2.16: Configuración del bloque DAQ assistant.	59
Figura 2.17: Configuración del bloque DAQ assistant.	60
Figura 2.18: Sección de la VI donde se almacena las muestras de la corriente en la carga y la tensión en la red.	61
Figura 2.19: Bloque que muestra la forma de onda en el panel frontal para las señales de entrada, en el dominio del tiempo.	61
Figura 2.20: Bloque Trigger and Gate y su configuración	62
Figura 2.21: Sección de la VI en el diagrama de bloques que muestra el paso 3 en su totalidad.	63
Figura 2.22: Vista del panel frontal para las amplitudes y fases de las líneas espectrales.	63
Figura 2.23: Sección del diagrama de bloques que implementa el paso 4.	64
Figura 2.24: Móvil BQ con su cargador utilizado en las mediciones.	65
Figura 2.25: Monitor de sobremesa utilizado en las mediciones.	65
Figura 2.26: Luminaria utilizada con sus 2 lámparas fluorescentes y el balasto electrónico.	66
Figura 3.1: Representación de una muestra de la señal de la red en el dominio del tiempo y su valor rms.	72
Figura 3.2: Representación de una muestra de señal en el dominio tiempo luego del cruce por cero.	72
Figura 3.3: Representación de la señal en el dominio frecuencia tras aplicar la DFT.	73
Figura 3.4: Representación de las fases de las componentes de la señal en el dominio de la frecuencia.	73
Figura 3.5: Representación de la señal de la corriente que fluye en la luminaria en el dominio del tiempo y su valor rms.	82
Figura 3.6 Representación de la señal de la corriente que fluye en la luminaria en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.	83
Figura 3.7 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente del día 13 de noviembre del 2019.	86
Figura 3.8 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 de noviembre de 2019).	87
Figura 3.9 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 noviembre de 2019).	87
Figura 3.10 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente (día 12 de noviembre de 2019).	88
Figura 3.11 Representación de los armónicos de orden 5º y 7º, de derecha a izquierda respectivamente (día 12 de noviembre de 2019).	89

Figura 3.12 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 de noviembre de 2019).....	89
Figura 3.13: Representación de la señal de la corriente que fluye en monitor en el dominio del tiempo y su valor rms.....	94
Figura 3.14 Representación de la señal de la corriente que fluye en el monitor en el dominio de frecuencia, tras aplicar la DFT.	95
Figura 3.15 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre del 2019.....	98
Figura 3.16 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre de 2019.	99
Figura 3.17 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 noviembre de 2019.	99
Figura 3.18 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre del 2019.....	100
Figura 3.19 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre de 2019.	100
Figura 3.20 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 noviembre de 2019.	101
Figura 3.21: Representación de la señal de la corriente que fluye en móvil en el dominio del tiempo y su valor rms.....	103
Figura 3.22 Representación de la señal de la corriente en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.....	104
Figura 3.23 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre del 2019.....	107
Figura 3.24 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre de 2019.	107
Figura 3.25 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 noviembre de 2019.	108
Figura 3.26 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre del 2019.....	109
Figura 3.27 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre de 2019.	109
Figura 3.28 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 noviembre de 2019.	110
Figura 3.29: Representación de la señal de la corriente que fluye en luminaria + monitor + cargador de móvil, en el dominio del tiempo y su valor rms.....	113
Figura 3.30 Representación de la señal de la corriente que fluye en luminaria + monitor + cargador de móvil, en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Distorsión armónica de la corriente en porcentaje del valor del armónico fundamental en función del número de lámparas	4
Tabla 1.2: Evolución de la iluminación y su eficiencia	5
Tabla 1.4: Definiciones matemáticas de forma de onda teniendo en cuenta sus componentes espectrales	15
Tabla 1.5: Valores de las tensiones de armónicos en los puntos de suministro, hasta el armónico 25, expresados en porcentaje de la tensión U_1	24
Tabla 1.6: Límites de distorsión de voltaje.....	26
Tabla 1.7 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicos impares para sistemas de distribución (120 V hasta 69 kV)	26
Tabla 1.8 Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con clasificación nominal superior 69 kV a 161 kV	27
Tabla 1.9: Límites para equipos de Clase A.....	38
Tabla 1.10: Límites para equipos de Clase C	39
Tabla 1.11: Límites para equipos de Clase D.....	39
Tabla 2.1. Características de las tarjetas de adquisición de datos NI USB6009 [8] y NI USB6210	53
Tabla 3.1: Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro, hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de la tensión fundamental U_1	71
Tabla 3.2: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen del día 12-11-2019	74
Tabla 3.3: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen del día 13 de noviembre de 2019.....	75
Tabla 3.4: Valores de THD calculados para los días 12 y 13 de noviembre del 2019.	75
Tabla 3.5. Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen día 12 de noviembre de 2019, tomando como referencia la norma UNE-EN 61000-3-2.....	76
Tabla 3.6: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen día 13 de noviembre de 2019. Tomando como referencia la norma UNE-EN 61000-3-2	77
Tabla 3.7: Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, para el día 13 de noviembre del 2019, se comparan con los límites establecidos en la norma.....	79
Tabla 3.8. Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, para el día 12 de noviembre del 2019, se comparan con los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2.	80
Tabla 3.9: Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase C de la Norma UNE-EN 61000-3-2 ..	84

Tabla 3.10: Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase C de la Norma UNE-EN 61000-3-2. .	85
Tabla 3.11. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11	86
Tabla 3.12: Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11	88
Tabla 3.13: Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, comparación de amplitudes relativas vs HG para el día 13 de noviembre del 2019.....	90
Tabla 3.14: Valores de los Grupos Armónicos(HG) en % con respecto al HG fundamental, comparación de amplitudes relativas con vs HG para el día 12 de noviembre del 2019.	91
Tabla 3.15: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI correspondientes al día 12 de noviembre del 2019.....	93
Tabla 3.16: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI correspondientes al día 13 de noviembre del 2019.....	93
Tabla 3.17. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D [3].....	96
Tabla 3.18. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase de D.....	97
Tabla 3.19 Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11 ^º	98
Tabla 3.20. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11 ^º	99
Tabla 3.21: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , para ambos días de las mediciones.	101
Tabla 3.22: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.	102
Tabla 3.23: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %. ..	103
Tabla 3.24. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D	105
Tabla 3.25. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D	106
Tabla 3.26. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11 ^º	107
Tabla 3.27. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11 ^º	108
Tabla 3.28: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , para ambos días de las mediciones.....	110

Tabla 3.29: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.	111
Tabla 3.30: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.	111
Tabla 3.31: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:30 am, día 12 de noviembre.	114
Tabla 3.32: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 03:00 pm, día 12 de noviembre.	115
Tabla 3.33: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:00 pm, día 12 de noviembre.	115
Tabla 3.34: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.	116
Tabla 3.35: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.	117
Tabla 3.36: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:30 am, día 13 de noviembre.	118
Tabla 3.38: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:00 pm, día 13 de noviembre.	119
Tabla 3.39: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.	119
Tabla 3.40: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.	120
Tabla 3.41: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 08:30 am.	120
Tabla 3.42: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 03:00 pm.	121

Tabla 3.43: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THDg y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 08:00 pm.....	121
Tabla 5.1: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:30 am, día 13 de noviembre.	134
Tabla 5.2: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 03:00 pm, día 13 de noviembre.	134
Tabla 5.3: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:00 pm, día 13 de noviembre.	135
Tabla 5.4: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:30 am, día 12 de noviembre.	136
Tabla 5.5: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 03:00 pm, día 12 de noviembre.	136
Tabla 5.6: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:00 pm, día 12 de noviembre.	137
Tabla 5.8: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THDg y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %, horario 03:00 pm.....	138
Tabla 5.9: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THDg y Tasa de Distorsión armónica total THDI , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %, horario 08:00 pm.....	138

1. Introducción

Sin lugar a dudas, en la actualidad la forma más útil de energía que utilizamos es la energía eléctrica. Está presente en casi todas las áreas de nuestra sociedad, la mayoría de la población mundial depende de manera directa o indirecta en su vida diaria de la energía eléctrica. Es parte indisoluble del avance económico y social de cada país, vinculada directamente a aplicaciones como las telecomunicaciones, las tecnologías de la información, la ventilación, el alumbrado, los procesos industriales, etc.

La sociedad moderna se enfrenta a una demanda cada vez mayor de energía debido al crecimiento económico mundial y al crecimiento poblacional, la demanda de viviendas, transporte, consumo de bienes y la creación de los mismos, todo esto implica un doble desafío, proporcionar energía confiable y asequible, al tiempo que reduce los impactos ambientales, incluidos los riesgos del cambio climático y la escasez prevista de recursos tradicionales de energía fósil [1].

En el escenario que nos presenta el nuevo milenio, está presente un incremento acelerado del uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos, la causa principal es el auge de la electrónica de potencia, como beneficio de esto se ha logrado un uso más eficiente de la energía eléctrica y aumentos considerables en la productividad de los procesos industriales. Sin embargo este pro ha provocado un contra, las corrientes armónicas generadas por los propios equipos eléctricos, las cuales distorsionan la onda de corriente sinusoidal original.

Este incremento de cargas no lineales se ha visto reflejado tanto en los usuarios residenciales como en la parte comercial de empresas. Por un lado, estos dispositivos son en su mayoría sensibles al nivel de calidad de la energía eléctrica que les alimenta (Power Quality, PQ). En una típica vivienda residencial actualmente podemos encontrar un importante número de cargas no lineales como: computadores personales, televisores, lámparas fluorescentes compactas, hornos microondas, etc. Además los complejos de oficinas, grandes almacenes, hospitales, centros de datos de Internet y otros que están dominados por iluminación fluorescente de bajo consumo con balastos eléctricos; que emplean fuentes de alimentación conmutada; fuente de alimentación ininterrumpida, computadoras personales, impresoras, etc.

Gran parte de estos dispositivos no lineales utilizan fuentes que transforman la corriente alterna en corriente directa, estas fuentes se basan en diodos rectificadores de onda completa que alimentan a un condensador conectado en paralelo con la carga. La reiterada descarga y carga de este condensador produce variaciones en la señal original de corriente no deseadas.

Estas corrientes armónicas que son originadas por las cargas no lineales se propagan en las redes de transmisión y distribución eléctrica, provocando el deterioro de los índices de calidad de la energía del suministro, afectando señales de comunicaciones

con interferencias, sobretensiones, aumento de la temperatura de trabajo de los equipos, sobrecarga en los conductores, y otros efectos nocivos [2].

Estas circunstancias han establecido la base para dedicar considerable atención a la calidad de la energía eléctrica en las últimas décadas, abordando intensamente el problema de distorsión de voltaje, de la cual una de sus formas principales es la distorsión armónica. La Unión Europea sufre pérdidas económicas por este motivo, por lo cual se han desarrollado normas y regulaciones con respecto a la calidad de la energía, garantizando niveles adecuados del suministro eléctrico.

1.1 Objetivos y estructura del TFM

Este trabajo de fin de máster (TFM) se plantea tres objetivos:

- ✓ Un estudio del estado del arte sobre la normativa y problemática de la distorsión armónica en las franjas espectrales 0-2 kHz y 2-9 kHz de las señales eléctricas.
- ✓ La implementación del hardware y el software para crear un instrumento virtual para medida y análisis en laboratorio de la señal de la red eléctrica de baja tensión y de la señal de intensidad de las cargas no lineales estudiadas.
- ✓ La medida de las emisiones armónicas e interarmónicas, de las cargas seleccionadas en el rango de frecuencias de 0-2 kHz y 2-9 kHz para la caracterización de las mismas. Análisis crítico de las medidas experimentales obtenidas tomando como base la norma UNE EN 61000-3-2 [3].

La memoria se compone de 5 capítulos, los cuáles se enumeran a continuación junto a una corta descripción de cada uno.

- **Capítulo 1**

El primer capítulo consta de la introducción del proyecto, estudio bibliográfico sobre los armónicos, interarmónicos, causas y efectos. Análisis de artículos actuales y normativa relacionados con esta temática.

- **Capítulo 2**

En él describimos la implementación de nuestro instrumento de medida conforme a la norma UNE-EN 61000-4-7 [4]. Con este instrumento podremos medir armónicos e interarmónicos, tanto en redes de suministro como a los equipos que conectáramos a estas.

Se describen los equipos empleados, los softwares utilizados, además de las características de las cargas que se utilizaran en las mediciones.

- **Capítulo 3**

En este capítulo se detalla cómo se ejecutaron las mediciones red de suministro, a las cargas, para medir las emisiones armónicas de los mismos.

Se obtienen los índices THD_I y THD_g para evaluar el contenido armónico de la señal en las cargas en los rangos de frecuencia de 0-2 kHz y 2-9 kHz. Se presentan los resultados y comparan los mismos según los límites establecidos en la Norma UNE EN 61000-3-2 [3].

Este capítulo es fundamental pues se prueba el instrumento creado, se detallan los resultados de las mediciones, se comparan los mismos con la normativa vigente y se emiten conclusiones al respecto.

- **Capítulo 4**

En este capítulo se realiza un resumen de lo plasmado en el TFM, presentando las conclusiones de cada apartado. Se describe las posibles líneas a seguir de la investigación realizada.

- **Anexos**

Se incorporar un conjunto complementario de medidas realizadas, así como hojas de características de equipos y componentes utilizados.

1.2 Breve estado del arte

Hemos realizado una amplia búsqueda bibliográfica en bases de datos como EEEEXPLORE [5], Scopus [6], Engineering Village [7].

Sobre este tipo de estudios, lamentablemente es especialmente amplia en lámparas pero no en otro tipo de cargas como las que si hemos sometido a pruebas en el desarrollo del presente TFM.

En el artículo [8] los autores presentan los resultados de mediciones realizadas a lámparas en el rango de frecuencia de 2 a 150 kHz. La norma UNE-EN 61000-3-2 [3] establece límites para las emisiones hasta 2 kHz sin embargo en el rango de 2 kHz a 150 kHz la llamada alta frecuencia (HF) no está regulada, por lo este artículo pretende dar elementos para caracterizar que sucede en ese rango. Como dato destaca que las lámparas fluorescentes con balastos de alta frecuencia poseen un filtro de bancos capacitivos para limitar las emisiones hasta 2 kHz, sin embargo, esto incrementa las emisiones de alta frecuencia, lo cual es precisamente lo que pretende demostrar con las pruebas que se presentan. El artículo se divide en cuatro secciones:

Se mide y analiza los valores de la señal de corriente de una sola lámpara fluorescente en el dominio de la frecuencia hasta 2 kHz, se verifica que las emisiones del equipo cumplen con los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2 [3].

aplicando la Discrete Fourier Transform (DFT o Transformada Discreta de Fourier), y se presentan los resultados.

En la segunda sección se realiza el análisis de las emisiones de 2 kHz a 150 kHz, aplicando la DFT y se sigue las recomendaciones de la norma UNE-EN 61000-4-7 [4] para el análisis espectral hasta 9 khz de agrupamiento de las líneas espectrales.

La sección tercera explica como cuando se analiza la señal en el dominio del tiempo se puede observar que el carácter de la componente de alta frecuencia varía en un ciclo. A pesar de que los ciclos sucesivos se comportan de manera idéntica plantea que dentro de un ciclo la señal no es estacionaria. Debe tenerse en cuenta que el algoritmo DFT asume implícitamente que la señal analizada es estacionaria. Por este motivo, se utiliza la Short-Time Fourier Transform (STFT) como herramienta para analizar cambios en el dominio de la frecuencia procesando la señal en periodos de medio ciclo. Con esta herramienta se divide los ejes de frecuencia y tiempo en ventanas o intervalos iguales, dando como resultado diagramas de tiempo-frecuencia. Los resultados se muestran en un espectrograma para la corriente que se mide en una lámpara.

La sección cuarta realiza las mismas mediciones realizadas para una sola lámpara, pero esta vez se le añade una más, luego otra y por ultimo una tercera. El resumen de esto es un análisis de que sucede cuando funcionan al mismo tiempo varias lámparas conjuntamente. Los valores se representan en una tabla reflejando las emisiones por armónico hasta el armónico número 15°. Se concluye con los resultados obtenidos que el espectro es independiente del número de lámparas que funcionan además que no existe cancelación de armónicos en frecuencia baja.

Tabla 1.1: Distorsión armónica de la corriente en porcentaje del valor del armónico fundamental en función del número de lámparas [8].

Numero Lamparas	Orden del Armónico						
	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°
1	7.2	1.7	1.9	1.7	0.6	1.3	1.0
2	7.7	1.7	2.1	1.7	0.4	1.3	0.9
3	7.7	1.8	1.9	1.7	0.5	1.3	1.0
4	7.6	1.8	2.0	1.7	0.5	1.4	1.0

El artículo concluye con la recomendación del uso de STFT como herramienta para analizar las variaciones del contenido espectral dentro de un ciclo. También que luego de realizar mediciones de corriente a 4 lámparas de manera simultánea, el espectro de frecuencia solo muestra pequeños efectos de cancelación hasta 15 kHz. Se plantea que con los datos obtenidos en alta frecuencia los contenidos armónicos disminuyen cuando se incrementa el número de lámparas [8].

En el artículo [9] se presenta una revisión bibliográfica de artículos científicos sobre la emisión armónica de equipos de iluminación LED. En la actualidad la iluminación LED

es la que posee mayor eficiencia y aún continúa en crecimiento, en la tabla 1.2 se muestra la evolución de las lámparas de iluminación en el tiempo.

Tabla 1.2: Evolución de la iluminación y su eficiencia [9].

Tecnología	Año de invención	Vida útil (horas)	Eficiencia (Lm/W)
Incandescente	1878	1000	15
Fluorescente	1930	8000	107
Halógena	1959	2000	24
CFL	1970	10000	63
LED	1990	100000	303

Se analizan en el artículo temas como la normas que se aplican a emisión de armónicos concretamente, el estándar IEEE Std. 519-2014 [10] y el UNE-EN 61000-3-2 [3]. Se realiza una investigación minuciosa presentando varias tablas resumen con los valores de las emisiones de distintas lámparas LEDs. Esto es plasmado a través de análisis de lámparas dimerizables y no dimerizables, cada grupo por separado y brindando conclusiones con cada uno.

A su vez presenta una sección para la comparación entre las lámparas LED vs las CFL, destacando que aún existen países que utilizan las CFL a pesar que generan mayor contaminación armónica.

Se dedica una sección para el análisis de la distorsión armónica cuando funciona más de una lámpara LED de manera simultánea. Los datos se reflejan en una tabla. Presenta a su vez una tabla resumen de varios artículos con los que se presentan soluciones, basadas en controladores que combinan filtros, para disminuir la emisión de armónicos cuando se utilizan muchas lámparas LED. Los resultados de estos artículos en la reducción del THD (distorsión armónica total o Total Harmonic Distortion) son prometedores.

Este artículo concluye con resultados experimentales sobre las lámparas LED estableciendo que impactan de manera negativa en el sistema de energía con la emisión de armónicos, aunque mucho menos que sus predecesores. Su impacto negativo crece cuando se utilizan lámparas LED dimerizables.

El artículo destaca que la mayoría de los estudios que se han realizado anteriormente han estado enfocados en luminarias LED con valores de potencia menores que 25 W. Esto implica que las luminarias o paneles LED que se utilizan en entornos industriales o empresariales que contribuyen a las emisiones se están dejando fuera de muchos análisis, por lo que recomienda futuros trabajos de investigación que cubran esta área [9].

La referencia [11] trata las emisiones de armónicos generados por elementos de iluminación LED en alta frecuencia. En el mismo se detalla el impacto que provocan los armónicos en los sistemas eléctricos de instalaciones comerciales, destacando lo

que son generados específicamente por el uso de las luminarias LED. Se describe el impacto en motores, transformadores, capacitores, interruptores, contactores o relés, entre otros.

Este artículo es parte de una serie de trabajos realizados por los autores en los que describen los efectos negativos del uso de fuentes de luz electroluminiscentes. Los autores plantean su preocupación por el uso exponencial que están teniendo las lámparas LED, son utilizadas en oficinas, hogares, alumbrados públicos e industriales, por ultimo también en automóviles. Presentan una actitud crítica debido a que este tipo de lámparas tiene dimensiones limitadas, por lo que aplicar circuitos de corrección para limitar la distorsión de corriente dentro de estas es difícil.

Se realizan mediciones experimentales sobre dos lámparas LED diferentes, para analizar las distorsiones que pueden presentar las señales de corriente de las mismas, los resultados se evalúan teniendo en cuenta las normas que rigen las emisiones. Los LED utilizados para las pruebas fueron de potencia menor a 25 W.

Se propone el uso de fuentes de alimentación de dos etapas para sistemas que contiene gran cantidad de lámparas LED con el objetivo de limitar los efectos negativos de las emisiones de armónicos de orden superior. Esto se logra con el uso de fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), que trabajan con la topología VFI (Independent Frequency Voltage), es decir, en línea. Esto es muy utilizado por operadores de telefonía y telecomunicaciones.

Además se repiten las mismas pruebas realizadas a las lámparas LED utilizando un bloque de alimentación de dos etapas explicado anteriormente, los resultados demuestran que las emisiones disminuyen considerablemente.

El artículo concluye avalando con los resultados que presenta que los sistemas de iluminación que usan lámparas LED inyectan serias distorsiones de corriente de extracción, que no es más que el impacto negativo de los armónicos, y además afectan los sistemas de energía de suministro. Esto ocasiona aumento de los costos de utilización de la electricidad por las pérdidas que producen los armónicos.

Este artículo recomienda a su vez, basado en los resultados que se obtuvieron en instalaciones donde exista sistemas de iluminación con lámparas LED, el uso de fuentes de alimentación de dos etapas [11].

La referencia [12] es el resultado de una investigación que se realiza, con el objetivo de analizar los aspectos a tener en consideración referente a las emisiones armónicas de equipos de iluminación LED en proyectos de alumbrado público.

Para ello se realizan varias pruebas a cinco lámparas LED de varias marcas comerciales y diferente potencia. Los resultados son analizados y presentados en el dominio de frecuencia y en el dominio tiempo-frecuencia; también a través de una

tabla que ilustra los valores de THD de las lámparas utilizadas. Se concluye en el mismo que las lámparas que se utilizan cumplen con los requerimientos de la norma UNE-EN 61000-3-2.

El documento [13] es el resultado de investigaciones realizadas para evaluar las emisiones de varias lámparas fluorescentes con balasto de alta frecuencia. Se realizan mediciones de tensión y corriente y los resultados se analizan en el dominio de la frecuencia y en el dominio tiempo-frecuencia.

Se estudia a su vez el comportamiento de la distorsión con el incremento del número de lámparas. Se realizan varios tipos de análisis:

- El primero analizando el comportamiento de la señal de corriente que se mide hasta 2 kHz aplicando la norma UNE-EN 61000-4-7, con sus correspondientes análisis en los dominios frecuencia y dominio tiempo-frecuencia solo para una lámpara.
- El segundo análisis estudia el comportamiento en alta frecuencia de 2 kHz hasta 150 kHz, utilizando el método de agrupación de líneas espectrales propuesto en la norma UNE-EN 61000-4-7 para el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz.
- El tercer análisis presenta los resultados de THD para tres rangos de frecuencia: de 0 a 2 kHz, 2 kHz a 9 kHz y de 9 kHz a 150 kHz.

Posteriormente repiten los análisis anteriores pero en esta ocasión con varias lámparas simultáneamente, los resultados son sorprendentes. En el rango de 0 a 2 kHz las emisiones armónicas se encuentran entre los límites establecidos por la norma UNE-EN 61000-3-2, sin embargo en el rango de 2 kHz a 9 kHz la distorsión aumenta linealmente con el número de lámparas utilizadas, en el rango de 9 kHz a 150 kHz solo existe un pequeño aumento [13].

El artículo [14] resulta muy interesante por exponer un ejemplo práctico de los efectos de la distorsión armónica en los transformadores. Estos equipos son piezas fundamentales en los sistemas de energía eléctrica. La distorsión armónica en estos equipos produce pérdidas excesivas y por consiguiente, aumentos de temperatura en su funcionamiento.

En los transformadores monofásicos que alimentan a cargas no lineales es muy importante la medida de las pérdidas. Estas se deben a dos cuestiones fundamentales: pérdidas resistivas y corrientes parásitas en los devanados y pérdidas magnéticas parásitas en el núcleo. No obstante, cuando hay armónicos presentes son más preocupantes las pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de eddy), la razón es que estas aumentan con el cuadrado de la frecuencia. En consecuencia, el uso de cargas no lineales en un sistema de potencia reduce la vida de trabajo de un transformador por las pérdidas por aumentos de temperatura.

En el documento se realiza un análisis con detalle del efecto que causan los armónicos en un transformador de 1 kVA. Para generar los armónicos que afectarán al transformador se utiliza una fuente de oscilador de frecuencia N700E. Utilizando un analizador de potencia Fluke-435 se mide los parámetros THD, el factor K

$K = \sum_{h=1}^{\infty} (I_{h(pu)})^2 * h^2$ Donde $I_{h(pu)}$ es la corriente armónica, y por último el factor de cresta.

En las pruebas se generan armónicos de tercer, quinto y séptimo orden. Los resultados muestran que existen grandes efectos en la señal de tensión y corriente, siendo el tercer armónico el que produce valores más destacados [14].

La referencia [15] aborda cómo la generación distribuida ha crecido exponencialmente en los últimos años en España. Según datos de Red Eléctrica Española (boletín de abril de 2019) el 42,1 % de la energía que se generó en la península fue a través de energías renovables.

En este documento se enfatiza en la generación distribuida (distributed generation o DG) y su impacto en un sistema de distribución eléctrico que posee gran cantidad de cargas no lineales. Parte importante de los componentes de los sistemas de generación distribuida son inversores electrónicos en los sistemas de potencia, los cuales son de naturaleza no lineal y que por lo cual producen distorsión armónica.

A lo largo de este documento se realiza una investigación de cuál es el impacto de la distorsión armónica de la generación distribuida en un entorno residencial con varias cargas no lineales. Para llevar a cabo esta investigación se utilizó un panel solar y una turbina eólica como equipos de generación distribuida. El análisis armónico se llevó a cabo en el Punto de Acoplamiento Común (PCC o Point of Common Coupling).

Se establecieron dos escenarios, uno con la generación distribuida y otro sin ella. Mientras se modelaba el sistema, fueron utilizados parámetros de cargas no lineales como computadoras personales, lámparas fluorescentes compactas (CFL), hornos de microondas y refrigeradores.

A través de la simulación se obtuvo como conclusión que con la introducción de DG se produjo un aumento significativo del $\mathbf{THD_v}$ por encima del límite permitido en el PCC, según los parámetros establecidos en el IEEE Standard 519-2014 [10].

El artículo [16] es una encuesta que se realiza a diversas empresas en Irlanda con respecto a la sensibilidad que poseen estas a la calidad de la energía eléctrica. Los sistemas de energía ya sea residenciales, empresariales o de industrias precisan de un suministro de energía eléctrica confiable y de buena calidad. Es bien reconocido y cuantificado las interrupciones del sistema eléctrico y su impacto. Sin embargo, un sistema de suministro de energía eléctrica puede ser fiable, es decir, no presentar interrupciones pero presentar baja calidad de energía.

Este documento plantea que a pesar de que los operadores de sistema de energía están muy conscientes del efecto adverso de la baja calidad de la energía, sin embargo, ciertas industrias se han vuelto vulnerables a sus características de cargas y sensibilidades en las mismas. Por lo cual han destinado recursos para monitorear y mitigar la baja calidad de la energía.

En el mismo se realiza una revisión de varios estudios que han investigado los costos de la mala calidad de la energía en la industria. Las encuestas que realizan se enfocan a las interrupciones del servicio, pero otros efectos negativos como los armónicos, las interrupciones breves, los transitorios, las subidas y caídas de tensión, son menos estudiados y comprendidos.

En el mismo se examinan que dificultades pueden existir para cuantificar los costos de la baja calidad de la energía eléctrica, utilizando el método chi-cuadrado (Pearsons's χ^2) para determinar los efectos negativos de la mala calidad energética. Su caso de estudio involucro más de 40 centros de fabricación y datos en Irlanda.

Según este estudio existen muy pocos artículos que cuantifican a través de costos fenómenos de PQ (Power Quality) como armónicos, transitorios y sobretensiones, sin embargo, las interrupciones cortas y largas generalmente se evalúan bien. Este fenómeno se debe a que es complicado cuantificar los gastos por la diversidad de equipos que utilizan los clientes, la hora del día, semana o el año, además que tipo de cliente está involucrado (residencial, industrial o publico), en algunos casos las perdidas pueden variar incluso para el mismo cliente.

El artículo plantea que solo para la industria el costo anual por mala calidad de la energía supera los 150 billones de euros en Europa, pudiendo representar hasta el 4 % de los ingresos de la industria en Europa. Las caídas de tensión e interrupciones cortas representan casi el 60 % del costo de la mala calidad de la energía para la industria. Sin embargo también se consideran significativas las pérdidas por factores como la oscilación de tensión y los armónicos.

A través de este documento [2] se realiza un análisis de varias cargas residenciales y el aporte armónico de las mismas en un sistema de distribución. En el mismo se evalúan los efectos que producen los fenómenos de diversidad y atenuación en la cancelación cuando se funcionan varias cargas de manera simultánea, en paralelo y con diferentes niveles de potencia. Esto es realizado a través del programa EMTP (ElectroMagnetic Transients Program), el cual permite realizar analizar circuitos eléctricos, en régimen transitorio.

A su vez utilizando el EMTP, que también permite modelar de manera matemática sistemas eléctricos, reemplazaron las cargas por modelos de convertidores integrados por diodos rectificadores. Los autores realizaron varias pruebas de laboratorio y con la ayuda de un osciloscopio digital con memoria, registraron cuales fueron los consumos de corriente de varias cargas típicas de viviendas residenciales. Desarrollando posteriormente modelos muy semejantes a cargas no lineales que querían reemplazar. Una vez obtenidos los modelos analizaron los efectos de cancelación de armónicos, el

efecto de diversidad y el efecto atenuación. Los resultados fueron presentados en varias tablas con los correspondientes valores.

Las conclusiones de este documento arrojan que cuando combinaron las cargas los valores de las distorsiones armónicas son cercanas o menores, que los valores de la distorsión más baja de las cargas medidas de manera individual. Cuando evaluaron conectadas en paralelo, cargas similares y con valor igual valor de potencia, se constató una disminución del THD_I del 97 % al 75 %, esto utilizando 10 unidades. Este mismo efecto se repitió cuando simularon 124 computadoras conectas a un mismo alimentador, en este caso el THD_I disminuyó del 88 % al 34 %.

Este documento [17] es el resultado de una investigación de los autores a más de 120 equipos electrodomésticos que se consideran cargas no lineales. El número de equipos electrónicos que utilizan circuitos de conmutación de alta frecuencia ha aumentado considerablemente (los llamados circuitos de corrección del factor de potencia activa). Estos circuitos son utilizados para la reducción de los armónicos en la banda de frecuencia de 0 a 2 kHz, además de que también permiten el incremento de la eficiencia energética. Sin embargo inyectan emisiones armónicas por encima de 2 kHz, es decir, en la banda de 2 kHz a 150 kHz, la llamada banda de los supra armónicos.

Con este trabajo los autores presentaron un grupo de criterios e indicadores con el objetivo de clasificar las emisiones de los supra armónicos, de este modo establecer bases para una futura estandarización en esta área, analizando las características de las emisiones en esta banda de frecuencia.

Por lo general los análisis que son realizados a equipos para observar el comportamiento de las emisiones armónicas se realiza en el dominio de la frecuencia y el dominio tiempo. El documento distingue tres maneras de representar las emisiones de supra armónicos, en el dominio de la frecuencia, en el dominio tiempo-frecuencia y en el dominio tiempo. Para realizar estas representaciones utilizaron un método obtener cada una de las representaciones dígame para la representación en el dominio frecuencia se utiliza la DFT, para el dominio tiempo-frecuencia la STFT, por ultimo para el dominio tiempo después de extraer el contenido supra armónicos con la utilización de filtros.

En el trabajo se definieron criterios para cada uno de estos dominios, estos se presentaron en tres tablas. Para los autores se consideran supra armónicos los armónicos de la banda de 9 kHz a 150 kHz, y divide sus análisis en tres bandas:

- 9 kHz a 30 kHz
- 30 kHz a 95 kHz
- 95 kHz a 150 kHz

Los resultados de los análisis son presentados en el mismo. Con el trabajo se pretende establecer un novedoso método para caracterizar la emisión armónica en la llamada alta frecuencia (9 kHz a 150 kHz). Además, luego de analizar más de 120

equipos, con los resultados obtenidos concluyen que la emisión en la HF en la mayoría de los casos analizados no es constante pero tiene variaciones en la frecuencia y/o la magnitud con respecto al ciclo de potencia.

➤ ¿Qué es la calidad de la Energía Eléctrica o Power Quality?

Es de gran importancia tanto para el suministrador de la energía eléctrica como para el usuario final la medición y análisis de la potencia. Para el proveedor de la electricidad la calidad de la energía se interpreta como la carga de penalidades para altas demandas, malos índices de potencia y en variaciones de la forma de onda original.

Por la parte del usuario final se entiende esto como el suministro de energía que cubra por entero sus requerimientos en cuanto a calidad y cantidad, es decir, un suministro que garantice unos parámetros establecidos a través de un contrato, de frecuencia y amplitud determinada, con un porcentaje de error que no perjudique sus instalaciones. Tres factores caracterizan a la calidad de suministro: *limitación de las variaciones de voltaje*, *control de la frecuencia eléctrica* a su valor nominal y *la continuidad del servicio* (considerando el mínimo de fallas del suministro de potencia).

La tensión, a la frecuencia fundamental es una función sinusoidal de amplitud y frecuencia constante. En la práctica esta es una situación ideal, no existe, es necesario calcular, realizar mediciones, predicciones y comparar en varios sistemas sus imperfecciones, además en dependencia de los equipos y aplicaciones establecer límites aceptables [18].

Actualmente se ha convertido en un objetivo estratégico la calidad de la electricidad para los fabricantes de equipos eléctricos, para el personal de explotación, para el personal de gestión o mantenimiento de instalaciones terciarias o industriales, además de las compañías eléctricas que la producen por estos motivos:

- Incrementar la competitividad económica entre empresas.
- Aumento del uso de equipos que son sensibles a las perturbaciones de tensión, que a su vez son perturbadores.
- La liberalización del mercado energético para obtener más desarrollo y competitividad [19].

La tensión de alimentación puede variar de tal manera que puede constituir un obstáculo particular para el correcto funcionamiento de un determinado equipo, esto puede suceder debido a varios factores que en su mayoría son a corto plazo y/o relacionadas con la frecuencia.

Usualmente se usa el término "Calidad de energía eléctrica (PQ)" para describir las características especiales de la tensión de alimentación, fundamentalmente en países desarrollados donde se ha hecho hincapié en la eliminación o disminución de la variación de la tensión ordinaria y la discontinuidad, pos ser considerados asuntos de preocupación frecuente. A la calidad de la energía relacionamos como principales fenómenos:

- Armónicos y otras desviaciones de la frecuencia prevista de la tensión de alimentación alterna.
- Distorsiones o variaciones de voltaje, destacando aquellas que causan parpadeo.
- Caídas de tensión e interrupciones breves.
- En sistemas trifásicos, voltajes desequilibrados.
- Sobretensiones transitorias, que tienen algunas de las características de los fenómenos de alta frecuencia [20].

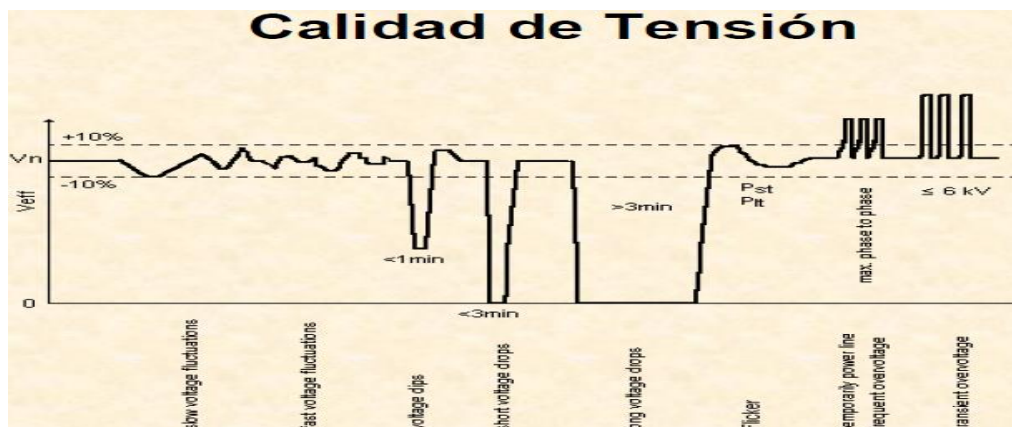


Figura 1.1: Diferentes perturbaciones que puede tener el suministro de energía [21].

1.3 Cargas lineales y las cargas no lineales

Si tomamos como criterio cómo es la corriente por la carga, podemos clasificar las cargas eléctricas en un sistema alimentado en alterna con tensiones senoidales, en dos grupos básicos.

- Cargas lineales.
- Cargas no lineales.

La forma de onda de la tensión y la corriente es la misma en una carga lineal. Podemos citar como ejemplo de cargas lineales a las lámparas incandescentes, los calefactores y los motores de inducción. La principal característica de este tipo de carga muy habitual a día de hoy, es que para realizar sus funciones se usa directamente la potencia eléctrica.

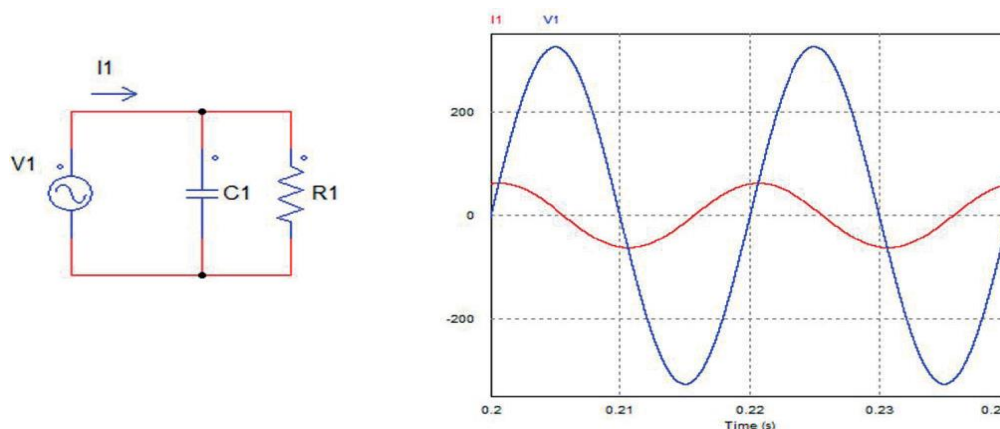


Figura 1.2: Carga lineal (capacitor y resistencia en paralelo), Forma de onda de la corriente en la carga [22].

Incluimos dentro del grupo de las cargas no lineales las que a partir de un generador senoidal solicitan corrientes no sinusoidales, como resultado la forma de onda de la tensión es diferente a la forma de onda de la corriente. En equipos y dispositivos eléctricos o electrónicos, donde el aspecto más importante es el uso eficiente de la electricidad y el ahorro energético, este tipo de carga la encontramos presente.

Ejemplo de cargas no lineales pueden ser elementos de calefacción con control de temperatura, lámparas de descarga y lámparas fluorescentes, ordenadores personales, equipos de control de velocidad de motores, etc. Es usual que en las cargas no lineales la energía eléctrica no sea usada directamente tal como es suministrada, la utilización de circuitos rectificadores es muy frecuente, los cuales proporcionan tensión y corriente continua a la salida, permitiendo la realización del trabajo para dicho equipo. La corriente no tiene forma sinusoidal, generalmente en los circuitos donde empleamos estos rectificadores [23].

La implementación en este nuevo milenio de equipos electrónicos modernos ha cambiado nuestro modo de vida, para bien diríamos muchos, sin embargo, han modificado la característica de carga de las instalaciones actuales. Hemos bautizado con el nombre de “cargas no lineales” a las cargas electrónicas, para describir la forma de la potencia.

En los ordenadores personales se usan fuentes de alimentación de tipo “switch” que son otro ejemplo de cargas no lineales. Este tipo de fuente está presente a su vez en muchísimas aplicaciones como por ejemplo impresoras láser, instrumentación médica, televisores, hornos de microondas e iluminación electrónica, entre otros dispositivos [23].

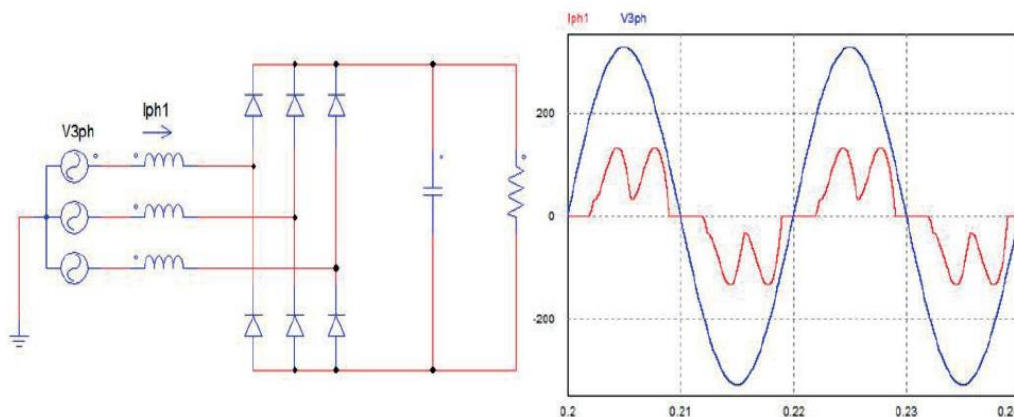


Figura 1.3: Ejemplo de circuito con carga no lineal (rectificador de 6 pulsos), la forma de onda de I_{ph1} esta distorsionada con respecto a la señal de alimentación V_{3hp} [22].

1.4 Armónicos. Definición y características

En un escenario ideal tanto la tensión a través del suministro de la red eléctrica así como la corriente resultante en las cargas, deben de ser formas de onda sinusoidales. La realidad nos muestra que estas formas de onda están distorsionadas, pudiendo expresar en términos de distorsión armónica con respecto a la forma ideal, esta desviación.

El uso de la palabra 'armónico' tiene su origen en la manera de describir el sonido y significaba una vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. En la ingeniería eléctrica se ha aplicado este mismo principio, donde podemos representar una forma de onda de corriente o voltaje distorsionada. Podemos definir armónico en sistemas eléctricos, como una componente sinusoidal de una onda periódica o una cantidad que posee una frecuencia que es múltiplo entero de una frecuencia fundamental.

Tabla 1.3 Frecuencias armónicas [20].

Orden Armónico F_h	Frecuencia (Hz) en redes de 50 Hz	Frecuencia (Hz) en redes de 60 Hz
1	50	60
3	150	180
5	250	300
7	350	420
11	550	660
13	650	780
...
50	$50 * n$	$60 * n$

En la tabla 1.3 queda reflejado las frecuencias para los armónicos de varios órdenes. En otras palabras, entendemos que armónicos son corrientes y tensiones que encontramos en el sistema eléctrico, que son múltiplos de la frecuencia fundamental de la red (50 Hz en Europa). En la tabla 1.4 podemos observar las diferencias entre armónico, interarmónico y subarmónico.

Tabla 1.4: Definiciones matemáticas de forma de onda teniendo en cuenta sus componentes espectrales.

Armónico	$f = nf_1$ donde n es un entero mayor que 0
Componente de continua	$f = nf_1$ con $n=0$
Interarmónico	$f = nf_1$ donde n es un número no entero mayor que 0
Subarmónico	$f > 0 \text{ Hz y } f < f_1$
$f_1 = \text{frecuencia fundamental de la tensión}$	

Usualmente encontramos constituyendo un espectro y originando una forma de onda totalmente distorsionada, varias ondas de armónicos de diferentes órdenes. Los datos más importantes para caracterizar habitualmente los armónicos son los siguientes:

- Amplitud: Generalmente la amplitud de un armónico es un porcentaje pequeño respecto de la componente fundamental de la señal; es una referencia del valor de la tensión o la intensidad del armónico.
- Fase: Se refiere al valor del ángulo del armónico respecto a la componente fundamental.
- Orden: No es más que el valor de su frecuencia respecto a la componente fundamental. Como está reflejado en la tabla 1.3 [18].

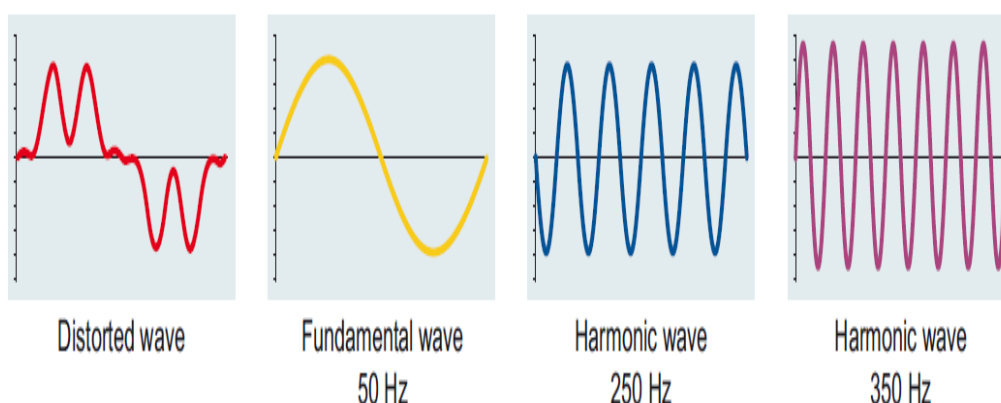


Figura 1.4: Descomposición de una forma de onda distorsionada [20].

Podemos representar una señal distorsionada a través de la serie de Fourier de la siguiente manera:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (1)$$

donde:

Y_0 : valor de la componente continua, la cual es generalmente nula,

Y_n : valor eficaz del armónico orden n ,

ω : frecuencia angular de la frecuencia fundamental,

Φ_n : desfase de la componente armónica en $t = 0$.

Adecuando para la tensión y la corriente se obtiene las ecuaciones:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} U_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (2)$$

1.4.1 Fuentes de armónicos

Fundamentalmente las corrientes armónicas son generadas por cargas residenciales e industriales con características no lineales. Dependiendo del método de operación, estas fuentes producirán armónicos a nivel constante o variable.

Podemos citar como ejemplos de cargas industriales que producen niveles significativos de distorsión armónica a los hornos de inducción, los variadores de velocidad, los hornos de arco, los convertidores de potencia o rectificadores, etc.

Según estudios que se han realizado, en la última década, se apunta a que el origen de la distorsión armónica está dada por:

Corrientes armónicas producidas por el sector comercial e instalaciones industriales. Se asocian con grandes instalaciones de equipos de tecnologías de la información y a los elevados niveles de corrientes armónicas derivadas del sector comercial. En el caso del sector industrial estas corrientes inyectadas generalmente son muy altas, por lo que muy frecuentemente es necesaria la instalación de filtros para mitigar sus efectos.

Corrientes armónicas generadas por equipos del sector residencial que se alimentan de la red de suministro tales como aires acondicionados, ordenadores personales, lámparas de iluminación de balastro automático y televisores, entre otros. Este tipo de equipos individualmente, de manera general presenta una potencia nominal relativamente pequeña, además que producen una corriente armónica no considerable, sin embargo son equipos de amplio uso en la sociedad por lo que es típico el uso simultaneo de estos por diferentes clientes en un área determinada; y aunque las contribuciones armónicas de un equipo sean pequeñas de manera

individual, a efecto global al no tener efecto de cancelación se acumulan y terminan siendo nada despreciables.

1.4.2 Efectos de los armónicos

A continuación presentaremos algunos de los principales efectos de la distorsión armónica en las redes:

- Se ha observado en instalaciones de los consumidores la destrucción de condensadores, por el efecto resonancia debido a la amplificación de la corriente de funcionamiento normal. Este efecto se ha evidenciado particularmente en:
 - En el sector industrial en instalaciones que poseen convertidores estáticos,
 - En el sector comercial, en el cual es frecuente, el uso de grandes cantidades de equipos de iluminación fluorescentes que contienen condensadores de factor de potencia.
 - En instalaciones que poseen grandes cantidades de equipos informático.
- El sobrecalentamiento de conductores neutros y transformadores causados por corrientes armónicas, es cada vez más frecuente, en especial son afectados por armónicos de tercer orden. Un resultado no deseado de estas corrientes armónicas. Cada vez más, sobrecalentamiento de transformadores y conductores neutros son causados por corrientes armónicas, particularmente del tercer orden. Los incendios pueden ser el resultado de corrientes armónicas de tercer orden excesivas porque estas corrientes armónicas se suman en el neutro, mientras que las corrientes de frecuencia fundamentales se cancelan entre sí, de modo que los conductores neutros en los circuitos trifásicos en el pasado no tenían que protegerse por separado contra la sobrecarga.
- Incremento de las pérdidas por el llamado efecto Joule [20].
- Aumentos de la temperatura de funcionamiento de lámparas de descarga o lámparas fluorescentes que contienen balastos inductivos.
- Disparos inadecuados que ocurren en los relés de protección provocados por modificaciones en los pasos por cero de la señal y en los valores pico.
- Los equipos electrónicos son muy sensibles a tensiones armónicas que superan determinados niveles mínimos. Computadoras, sistemas electrónicos de comunicaciones y equipos electrónicos de control de procesos como autómatas, robots, o microcontroladores poseen fuentes de alimentación que al convertir la señal de corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua para alimentar el circuito, pero están construidas y diseñadas asumiendo que no ocurrirán tensiones armónicas por encima de determinados niveles. Por lo cual, cuando estos límites son superados, existen daños en la precisión de estos equipos como aparición de datos erróneos o pérdida de datos, también operaciones fuera de secuencia de robots o máquinas herramientas que son controladas por un computador.

- Errores de medición en equipos de medida por inducción, debido a que están calibrados habitualmente para el funcionamiento con ondas de tensión puras y sin la presencia de componentes armónicas [24].
- Los fabricantes y suministradores de transformadores recomiendan que cuando los transformadores suministran más del 30 % de su capacidad nominal con cargas no lineales, se reduzca en un 10 % la cantidad de los mismos. Esto se realiza debido a los efectos de calentamiento que provocan las corrientes armónicas en los transformadores, por este motivo los sistemas de distribución y los consumidores en ocasiones se encuentran forzados a reducir el número de estos.
- Se evidencia la misma área de sección transversal de los conductores de fase y los conductores neutros de los sistemas e instalaciones de suministro. Esto lo corroboramos en instalaciones comerciales más modernas, con el uso de conductores neutros de sección trasversal más grande para mitigar los efectos de las corrientes armónicas del tercer armónico. Sin embargo, instalar conductores neutros de mayor diámetro en las redes existentes en retrospectiva tendría un costo astronómico, sumando el consiguiente incremento de la demanda del aluminio y el cobre, por lo que no se contempla esta opción de manera realista.
- La comunicación telefónica también puede ser afectada por corrientes armónicas, provocadas por cargas no lineales de clientes que fluyen a través de la red de suministro de energía [20].

1.5 Interarmónicos. Definición y características

Los interarmónicos son las componentes de frecuencia no múltiplos de la frecuencia fundamental en ondas de corriente y de tensión.

Son producidos fundamentalmente por convertidores estáticos de frecuencia, cicloconvertidores, equipos de soldadura de arco y hornos de arco, motores de inducción, convertidores subsíncronicos. Sin embargo, de manera general, se considera como fuente potencial de interarmónicos cualquier tipo de carga no pulsante sincrónicamente con la frecuencia fundamental.

Las perturbaciones originadas por los interarmónicos no han sido muy estudiadas hasta el momento, sin embargo, debido al aumento que han experimentado en las redes de suministro y sus efectos nocivos en estas, ha provocado el incremento por su medida y análisis.

La medición de interarmónicos puede tornarse una tarea con elevado nivel de dificultad. Señales con componentes interarmónicas no tienen por qué ser periódicas necesariamente, además en dependencia del intervalo de observación, puede tornar la señal como no simétrica.

La amplitud o valor de estas componentes interarmónicas en la actualidad es pequeña, la comparación de su medida en presencia de la componente fundamental y otras componentes armónicas puede pasar totalmente desapercibida. Pero el

incremento cada vez mayor de equipos de electrónica con características no lineales que se conectan a la red de suministro hace que estas componentes interarmónicas en conjunto aumenten sus niveles [25].

1.5.1 Efectos de los interarmónicos

Entre los efectos nocivos que puede causar la propagación de los interarmónicos a través de la red de distribución en los equipos que alimenta con energía eléctrica citaremos los siguientes:

- Aumentos de la temperatura de funcionamiento.
- En los sistemas mecánicos, oscilaciones de baja frecuencia.
- En las maquinas eléctricas, oscilaciones torsionales.
- Interferencias en señales de protección en líneas eléctricas y de control.
- Sobrecargas en el caso de filtros paralelos diseñados para armónicos de alto orden.
- Interferencias en señales de telecomunicación que perjudican el correcto funcionamiento de estas señales.
- Perturbaciones acústicas.
- Efectos de saturación en transformadores de corriente [25].
- Flicker en sistemas de iluminación. Este último es uno de los efectos adversos más importantes de los interarmónicos; estas componentes influyen en el valor eficaz y el valor pico de la tensión fundamental, provocando que estas fluctuaciones de tensión originen a su vez variaciones en la iluminación si la magnitud de los interarmónicos sobrepasa los niveles mínimos de inmunidad. Estos efectos en la iluminación son perjudiciales al ser humano [24].

1.6 Subarmónicos. Definición y características

No existe método de medida ni definición oficial para los subarmónicos en las ondas de corriente y de tensión en las normas internacionales. Son causadas fundamentalmente por acondicionadores de potencia de carga por modulación de ráfaga de pulso, ciclo conversores, generadores eólicos y por hornos de arco controlados por integración de ciclo, son componentes de frecuencia inferiores a la frecuencia fundamental. Constituyen una problemática poco estudiada en cuanto a sus efectos en la calidad de la energía eléctrica, resultado de esto es que no existan muchas referencias de sus consecuencias en transformadores, motores y el flicker lumínico que provocan [24].

1.6.1 Efectos de los subarmónicos

El efecto directo de la introducción de corrientes subarmónicas son las distorsiones de la tensión en baja frecuencia que se manifiesta como una modulación de la componente fundamental.

Encontramos entre los efectos de los subarmónicos los siguientes:

- El nocivo efecto del Flicker de luz en pantallas de visualización y sistemas de iluminación.
- En los transformadores, asimetría del ciclo de histéresis.
- Debido al aumento de temperaturas en los equipos, disminución de la vida útil.
- En el caso de los turbogeneradores se han registrado perturbaciones.
- Deficiencias en el correcto funcionamiento de sistemas de control remoto.
- En los tiristores, disparo erróneo.
- En los motores de inducción, reducción de la vida útil [24].

1.7 Distorsión armónica total

Para estimar el contenido armónico que puede contener una forma de onda, uno de los indicadores más frecuentemente usado es la distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion o THD). Este parámetro caracteriza la calidad de la señal, o expresado de otra manera cuan cercana es la forma de onda de esta a un seno puro. Puede ser aplicado tanto para corriente como para tensión, se puede obtener el THD_I como el THD_V .

Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas de una señal y el valor eficaz de la componente fundamental de la señal. Se expresa típicamente su valor como un porcentaje de la onda fundamental [25].

$$THD = \sqrt{\frac{\text{Suma de los cuadrados de todas las amplitudes}}{\text{Amplitud Fundamental al cuadrado}}} \times 100 \% \quad (3)$$

1.7.1 Distorsión armónica total de corriente THD_I

Este índice es el THD aplicado a una señal de corriente empleando los valores de intensidades armónicas y armónico fundamental. Puede tomar valores porcentuales de pocas unidades e incluso superar el 100 %, como sucede en fuentes de potencia conmutadas [25].

$$THD_I = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \quad (4)$$

Dónde:

K: es el número del armónico.

I_1 : Valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_K : Valor eficaz del armónico K.

1.7.2 Distorsión armónica total de voltaje THD_v

Este índice, al igual que el THD_i , se define como la relación existente entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental. Este índice se utiliza en sistemas de alta, media y baja tensión.

Podemos evaluar las tensiones armónicas de los siguientes modos:

- De manera individual, relacionando su amplitud relativa V_k con la componente fundamental de la tensión V_1 , donde k es el orden del armónico.
- De manera global calculando la distorsión armónica total de tensión con siguiente expresión [3]:

$$THD_v = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{V_k}{V_1}\right)^2} \quad (5)$$

Dónde:

V_1 : Valor eficaz de la onda fundamental de voltaje

V_k : Valor eficaz del armónico K.

K: es el número de armónico

1.8 Normativas sobre armónicos

Por mucho tiempo solo se tuvieron en cuenta como exigencias al suministro de la energía eléctrica fueron la estabilidad de la frecuencia de la tensión en la red y en los puntos de consumo, la estabilidad del valor eficaz y la continuidad del servicio.

Sin embargo, cada país se ha dado a la tarea de modificar las legislaciones y normativas en esta área, los motivos fundamentales: se ha complejizado la infraestructura de la generación, el suministro, la distribución y el consumo de la energía por el usuario final. En España la Ley 54/1997, del 27 de noviembre, del Sector Eléctrico y el Real Decreto 1955/2000, del 1 de diciembre regula el marco legislativo en esta área. A través de estas leyes se amplió el concepto de señales eléctricas e intensidad de la red y calidad de suministro, a su vez se plasmaron las responsabilidades por cada uno de los agentes implicados (dígase transporte, generación, distribución y consumo), en el cumplimiento estas.

Se pueden considerar las siguientes condiciones entre las más significativas para definir la calidad de la señal de suministro: estabilidad en tensión (fluctuaciones tipo flicker, modificaciones lentas, impulsos, huecos de tensión y cortes breves), estabilidad de la frecuencia (variaciones entre ciertos valores límite, dependiendo del tiempo que dure la alteración) y distorsión de la señal.

La distorsión de la señal se engloba en diferentes nombres o conceptos tales como contenido armónico, perturbaciones de onda o el más conocido Compatibilidad

Electromagnética (CEM). Es denominada (CEM) a la capacidad que poseen los equipos o sistemas eléctricos para mantener un funcionamiento satisfactorio en su entorno electromagnético, sin que este trabajar produzca perturbaciones que sean intolerables al resto de los equipos que se encuentren en su entorno.

- En el ámbito europeo se toman en consideración las recomendaciones hechas por la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC). Las propuestas que realiza se convierten en normas europeas (EN) por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), luego se adaptan por los países de la Unión Europea (en España estas normas pasan al conjunto de las normas UNE)
- En el ámbito americano se consideran las recomendaciones del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Estas normas son de gran influencia a nivel mundial.

Dependiendo del área donde se encuentre y su ámbito de influencia cada país adopta las normas propuestas por estas instituciones y desarrolla normativas propias para incorporarlas luego a sus legislaciones [26].

Se han diseñado las normas actuales con el objetivo de establecer límites a las corrientes armónicas de los usuarios de manera individual, garantizando que los niveles de armónicos presenten en su totalidad valores aceptables en el sistema de potencia, compartiendo la responsabilidad de su cumplimiento entre el suministrador y los usuarios.

1.8.1 Norma UNE EN 50160

1.8.1.1 Campo de aplicación y objeto

A través de esta norma se define, describe y especifica, cuales son las características fundamentales de la tensión que se suministrará por una red de distribución de corriente alterna para baja, media y alta tensión en el punto de entrega al usuario de la red, en condiciones de explotación normales. A través de esta norma se establecen los límites o valores que serán los esperados. Esta norma también establece los valores esperados o umbrales entre los cuales se esperará que mantengan los parámetros de la tensión en un punto de suministro dado de la red de distribución europea [27].

Su objeto fundamental es describir, definir y especificar los parámetros de la tensión de alimentación que se suministra, tales como:

- la frecuencia;
- la amplitud;
- la forma de la onda;
- la simetría de las tensiones de línea.

Durante la explotación normal de un sistema de alimentación dado, los parámetros indicados anteriormente pueden sufrir variaciones debido a modificaciones en la carga, por la ocurrencia de faltas debidas fundamentalmente a causas externas y por perturbaciones que se emiten algunos tipos de equipos.

Existen algunos fenómenos que poseen un impacto sobre la tensión que son singularmente imprevisibles, esto dificulta brindar valores útiles definitivos de sus correspondientes características. Fenómenos como por ejemplo, los huecos de tensión y las interrupciones de tensión, deben de ser interpretados en consecuencia debido a su imprevisibilidad. No se aplica esta norma para situaciones de explotación anormales, como por ejemplo las siguientes:

- Catástrofes naturales, condiciones climáticas extremas, entre otras;
- Interferencias que son provocadas por terceros;
- Decisiones gubernamentales u otro tipo de autoridad pública;
- Huelgas de trabajadores respaldadas por requisitos legales;
- Cuestiones de fuerza mayor;
- Interrupciones causadas por situaciones externas.

1.8.1.2 Características de la alimentación en Baja Tensión (BT)

- Frecuencia

Deberá ser suministrada la tensión a la frecuencia nominal a 50Hz. La frecuencia fundamental medida en períodos de 10 segundos, en condiciones normales de trabajo deberá situarse en los intervalos que se describen a continuación:

a) Para redes acopladas por conexiones síncronas a un sistema interconectado:

50 Hz \pm 1 % es decir 49,5 Hz a 50,5 Hz, durante el 99,5 % de un año;
50 Hz \pm 4 % / -6 % es decir 47 Hz a 52 Hz, durante el 100 % del tiempo;

b) para redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado:

50 Hz \pm 2 % es decir 49 Hz a 51 Hz, durante el 95 % de una semana
50 Hz \pm 15 % es decir 42,5 Hz a 57,5 Hz durante el 100 % del tiempo;

- Variaciones de la tensión de alimentación

Para condiciones de trabajo regulares, sin incluir los periodos con interrupciones, las alteraciones de la tensión de deberán superar el ± 10 % de la tensión nominal (U_n). Para suministro de electricidad en las redes que no se encuentran interconectadas con las líneas de transporte o en caso de usuarios ubicados en zonas remotas, las alteraciones de la tensión de deberán superar el ± 10 % / -15 % de la tensión nominal (U_n). Se establece para condiciones regulares de trabajo:

- el 95 % de los valores eficaces de la tensión suministrada, para cada periodo de una semana, promediados en 10 minutos debe de tomar valores de $U_n \pm 10 \%$, y
 - la totalidad de los valores eficaces de la tensión que se suministra promediados en 10 minutos $U_n \pm 10 \% / -15 \%$.
 - todos los valores eficaces de la tensión suministrada promediados en 10 min deben situarse en el intervalo $U_n + 10 \% / -15 \%$.
- Armónicos de tensión

Durante cada periodo de una semana, en condiciones regulares de trabajo, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica individual promediados en 10 minutos, de tomar valores menores o iguales a los valores reflejados en la tabla 1.5. No sobrepasará el 8 %, la Tasa de distorsión armónica total de la tensión que se suministra THD, tomando para este análisis la totalidad de los armónicos hasta el de orden 40.

Tabla 1.5: Valores de las tensiones de armónicos en los puntos de suministro, hasta el armónico 25, expresados en porcentaje de la tensión U_1 [27].

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

- Tensiones interarmónicas

No se reflejan en la norma límites para estos parámetros y queda por estudiarse cuáles serán los valores adecuados.

- Interrupciones de la tensión de alimentación

Son consideradas, por su naturaleza las interrupciones, eventos imprevisibles y que varían de un lugar a otro y en los periodos que ocurren. No es posible por el momento,

brindar resultados estadísticos que caractericen totalmente en lo referente a las medidas de la frecuencia de las interrupciones que abarquen conjunto de las redes europeas.

- Huecos/sobretensiones de la tensión de alimentación

Los huecos de tensión generalmente se producen por faltas que suceden en instalaciones de los usuarios de la red o en la red general de distribución.

Las sobretensiones se producen de manera general por maniobras y desconexiones de cargas.

Se consideran estos dos fenómenos sumamente aleatorios e impredecibles. El valor de la frecuencia anual depende fundamentalmente del punto de observación y del tipo de alimentación. Puede ser muy irregular en un año su distribución.

Por convención, el umbral de inicio del hueco es igual al 90 % de la tensión nominal; el umbral de inicio de las sobretensiones es igual al 110 % de la tensión nominal.

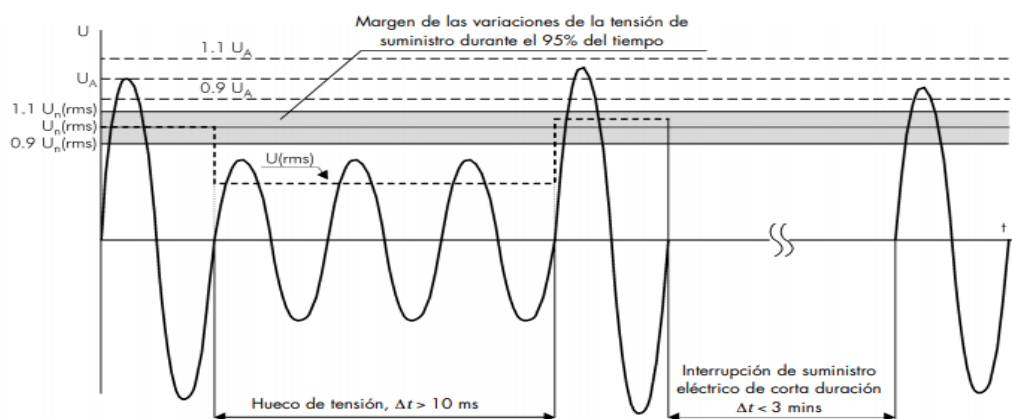


Figura 1.5: ilustración de un hueco de tensión y de una interrupción breve del suministro eléctrico. U_n –tensión nominal del sistema (rms). U_a amplitud de la tensión de suministro. $U(rms)$ valor eficaz de la tensión de entrada [28].

1.8.2 Norma IEEE 519-2014

A través de esta norma se realiza un enfoque conjunto entre las empresas de suministro de electricidad y los usuarios finales para disminuir el impacto de las cargas no lineales. Esta norma tiene como objetivo establecer recomendaciones para el diseño de sistemas eléctricos que contengan tanto cargas no lineales como lineales. A su vez se describe como deberán ser las formas de onda de corriente y tensión que pueden existir en el sistema, también define los límites de la distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema [10]. Se define como el Punto de Acoplamiento Común (PCC) a la interfaz entre fuentes y cargas; se deberá minimizar la interferencia entre los equipos eléctricos a través del cumplimiento de los objetivos de diseño [29].

Mediante este estándar en el PCC se analizan los límites de tensión y corriente armónica. Este es el punto donde varios usuarios comparten la misma red o podrán conectarse nuevos usuarios en el futuro.

Para las corrientes, sus valores de distorsión podrán referirse a una base constante, en este caso la componente fundamental. De este modo se provee de una referencia fija, sin embargo el valor de la fundamental podrá variar en un rango amplio [30].

1.8.2.1 Límites de distorsión de voltaje

Los valores límites recomendados para los armónicos de tensión son reflejados en la tabla 1.6, se indican estos límites para el componente armónico individual máximo y para el THD_V .

Tabla 1.6: Límites de distorsión de voltaje [10].

Voltaje del bus en PCC	HDv(%)	THD_V (%)
Inferiores a 69 kV	3	5
69kV hasta los 161 kV	1.5	2.5
Superiores a 161 kV	1	1.5

1.8.2.2 Límites de distorsión de corriente

Con esta norma se establecen los valores límites de distorsión en la corriente para un usuario en base a la distorsión de la demanda total de corriente THD_I . Se presentan en la tabla 1.7 los límites para la distorsión de corrientes armónicas de órdenes impares en sistemas de distribución (120 V hasta 69 kV).

Tabla 1.7 Límites máximos (%) de distorsión de corrientes armónicas impares para sistemas de distribución (120 V hasta 69 kV) [10].

$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Dónde:

I_{sc} es la corriente de corto circuito en el punto de medición PCC.

I_L es la corriente de demanda máxima (con la componente de frecuencia fundamental) en el punto PCC.

Tabla 1.8 Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con clasificación nominal superior 69 kV a 161 kV [10].

$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

En la tabla 1.8 se presenta los límites máximos de distorsión de corrientes armónicas recomendadas para sistemas de distribución (69 kV hasta 161 kV).

1.8.3 Norma UNE-EN 61000-4-7

1.8.3.1 Objeto y campo de aplicación

Esta sección de la norma UNE-EN 61000 se establece para la medida de las tensiones y corrientes armónicas en las redes de suministro, a su vez para la medición de las corrientes armónicas que pueden ser emitidas por los equipos. Se especifican las características para el diseño de un instrumento de medida normalizado.

Esta norma es aplicable a la instrumentación que se destina para la medición de las componentes espectrales de frecuencias que van desde 0 hasta 9 kHz que se superponen a la componente fundamental en las redes de suministro de 50 Hz y 60 Hz. En esta norma por consideraciones prácticas se distingue entre interarmónicos, armónicos y otras componentes.

A su vez esta norma define como deben de ser los instrumentos de medida para realizar pruebas a equipos individuales de acuerdo con los niveles mínimos de emisión establecidos en normas como la UNE-EN 61000-3-2, también para la medición de tensiones y corrientes armónicas en las redes de suministro como tal [4].

1.8.3.2 Herramienta utilizada para el análisis de las señales

Para el análisis del contenido espectral que posee la señal se utiliza como herramienta la Transformada Discreta de Fourier. La transformada de Fourier es una función matemática complicada pero poderosa, con este procedimiento podemos mapear cualquier señal analógica si esta es periódica a una infinita serie de sinusoides, cada una de estas con un valor determinado de fase y amplitud [4].

El teorema en esencia afirma que se puede tomar cualquier señal periódica y descomponerla en ondas sinusoidales de diferentes amplitudes y frecuencias. Se le llama espectro de frecuencias a esta descomposición, y lo representamos a través de una gráfica donde las frecuencias estarán en el eje X, y las amplitudes de cada senoidal resultante de la descomposición en el eje Y. Se puede expresar la señal de la siguiente manera:

$$F(t) = C_0 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m \sin\left(\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m\right) \quad (6)$$

$$C_m = |b_m + ja_m| = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$$

$$C_m = \frac{C_m}{\sqrt{2}}$$

Con:

$$\varphi_m = \arctan\left(\frac{a_m}{b_m}\right) \quad \text{si } b_m \geq 0 \quad \text{y} \quad \varphi_m = \pi + \arctan\left(\frac{a_m}{b_m}\right) \quad \text{si } b_m < 0$$

$$b_m = \frac{2}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \times \sin\left[\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m\right] dt$$

Y:

$$a_m = \frac{2}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \times \cos\left[\frac{m}{N} \omega_1 t + \varphi_m\right] dt$$

$$C_0 = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) dt$$

donde:

ω_1 es la frecuencia angular de la componente fundamental ($\omega_1 = 2\pi f_1$).

T_w es el ancho o duración de la ventana temporal ($T_w = NT_1$; $T_1 = 1/f_1$).

C_m es la amplitud de la componente de la frecuencia $f_m = \frac{n}{m} f_m$.

N es el número de períodos de la componente fundamental contenidos en el ancho de la ventana temporal.

C_o es la componente de corriente continua.

m es el número ordinal (orden de la barra espectral) relativo a la frecuencia de base ($f = 1/T_w$).

Los coeficientes φ_m , C_m constituyen fase y amplitud respectivamente de una señal seno infinita. Se obtienen un par de ellos para cada línea espectral como resultado del análisis de Fourier.

El proceso inverso también es posible realizarlo, es decir, teniendo como información las líneas de espectrales de cualquier señal, podemos reproducir su forma de onda en el dominio del tiempo. A este proceso inverso de reconstruir una señal determinada se le denomina Transformada Discreta Inversa de Fourier o IDFT.

Nuestra señal analógica a analizar, $f(t)$, es muestreada, digitalizada y almacenada posteriormente. Cada grupo de M muestras forma una ventana temporal sobre la que se calcula la DFT. La norma plantea que para redes de 50 Hz la ventana temporal tiene un ancho 10 períodos de la componente fundamental ($N=10$), es decir $T_w=200$ ms si no se han producido variaciones de frecuencia de la red eléctrica. En consecuencia nuestras líneas espectrales estarán separadas entre sí con una resolución espectral de 5 Hz dado que este es el valor inverso de la duración de la ventana de muestreo [4].

1.8.3.3 Estructura general del instrumento de medida

Representamos la estructura general de un instrumento de medida en la figura 1.6. El diseño del mismo puede poseer o no la totalidad de los bloques y salidas indicadas.

El instrumento principal posee las siguientes partes:

- un circuito de entrada que contiene un filtro anti-aliasing;
- un convertidor analógico/digital (A/D) que contiene una unidad de muestreo y retención;
- se incluye por si fuera necesario sistema de sincronización y una ventana de ponderación.
- se incluye un procesador DFT para obtener los coeficientes de Fourier a_m (coeficiente de amplitud de una componente en seno) y b_m (coeficiente de amplitud de una componente en coseno) (“Salida 1”). Esto es completado además por módulos especiales dedicados a evaluar los valores de la corriente y/o tensión [4].

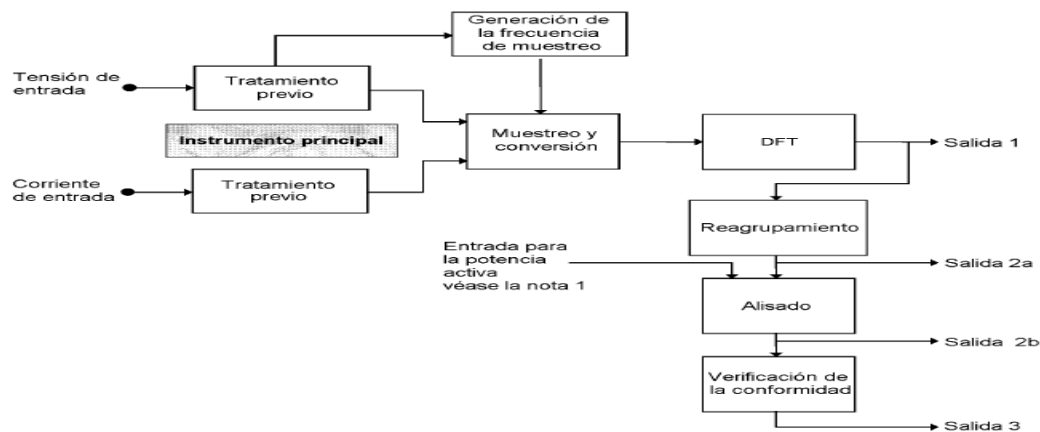


Figura 1.6: Estructura general del instrumento de medida [4].

1.8.3.4 Evaluación de las emisiones de armónicos hasta 2 kHz

El estándar nos propone para la evaluación de las emisiones la definición de diferentes agrupaciones de las líneas espectrales (armónicos e interarmónicos).

Cada agrupación de las líneas espectrales posee un valor eficaz, este método lo aplicaremos posteriormente por lo que exponemos con claridad el procedimiento:

1.8.3.5 Grupo armónico

La obtención de los grupos armónicos es realizada a través de la ecuación 7, que no es más que agrupar la suma de los cuadrados de las líneas espectrales intermedias de dos armónicos consecutivos, esto lo podemos visualizar en la figura 1.7, el grupo armónico de orden n resultante (una imagen visual del mismo correspondería a la zona central del área que está sombreada) cuya amplitud es $G_{g,n}$ (en valor eficaz). Los grupos armónicos se obtienen tomando como punto de partida la salida 1 (figura 1.6) y posteriormente aplicando la DFT.

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad \text{para redes de 50 Hz} \quad (7)$$

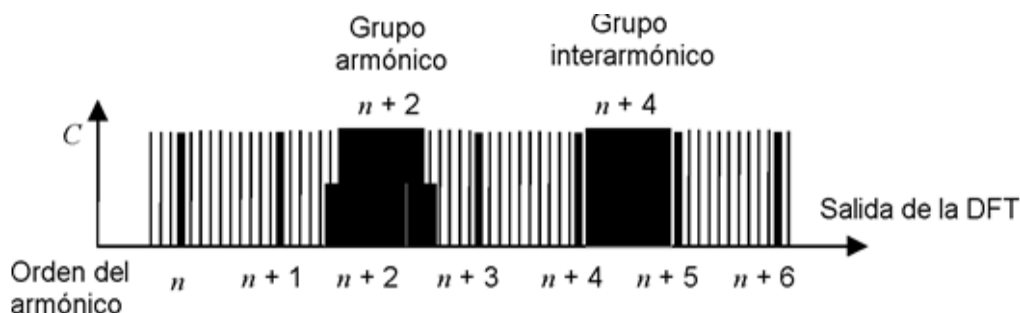


Figura 1.7- Ilustración de grupos armónicos e interarmónicos [4].

Se aplica la ecuación 7 posteriormente a realizar la DFT, el coeficiente C_{k+i} correspondería al valor eficaz una componente espectral de una línea espectral. Se define a $G_{g,n}$ como el valor eficaz de un grupo armónico, es decir, como la suma cuadrática del valor eficaz de un armónico y las componentes espectrales que se encuentran a su lado. Se puede observar más claramente en la figura 1.7 que es el grupo armónico [24].

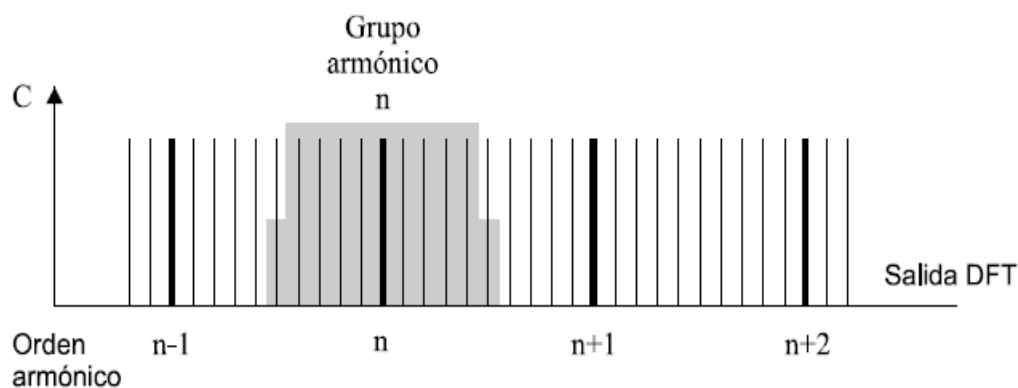


Figura 1.8: Líneas espectrales del grupo armónico [25].

1.8.3.6 Subgrupo armónico

Este valor es la raíz cuadrada que se aplica a la suma cuadrática del valor eficaz de un armónico y de las dos componentes espectrales que se encuentran a ambos lados de este. Una imagen visual de esto la tenemos en la figura 1.9 [24].

Obtenemos el valor del valor eficaz de un subgrupo armónico, $G_{sg,n}$ a través de la ecuación 8.

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (8)$$

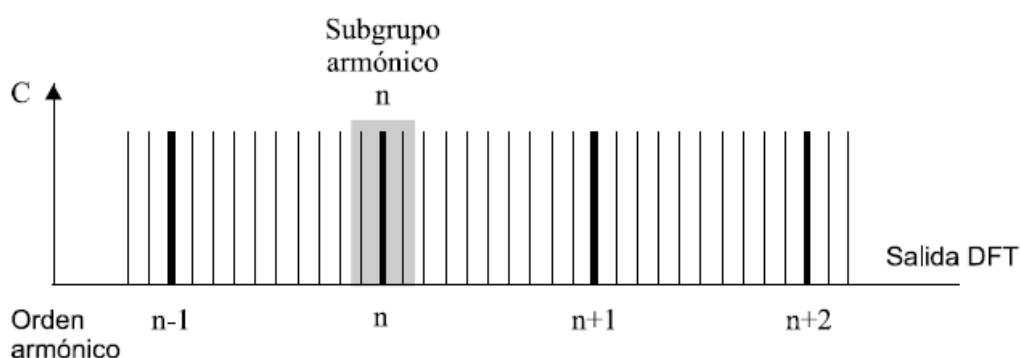


Figura 1.9: Líneas espectrales del subgrupo armónico [24].

1.8.3.7 Subgrupo interarmónico centrado

Calculamos el valor eficaz de un subgrupo interarmónico centrado, $C_{isg,n}$ a través de la ecuación 9. Este valor corresponde al valor eficaz de la suma de todas las componentes interarmónicas que se encuentran entre dos frecuencias armónicas contiguas [24].

$$C_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{k+i}^2 \quad (9)$$

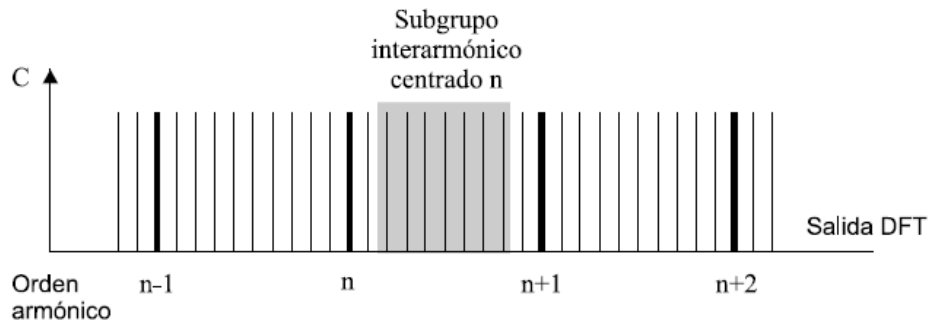


Figura 1.10: Líneas espectrales del subgrupo interarmónico centrado [24].

1.8.3.8 Grupo interarmónico

Se puede definir al grupo interarmónico, $C_{ig,n}$ como el valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre frecuencias armónicas consecutivas [25].

$$C_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad (10)$$

Se denota $C_{ig,n}$ al valor eficaz del grupo interarmónico comprendido entre los armónicos n y n+1.

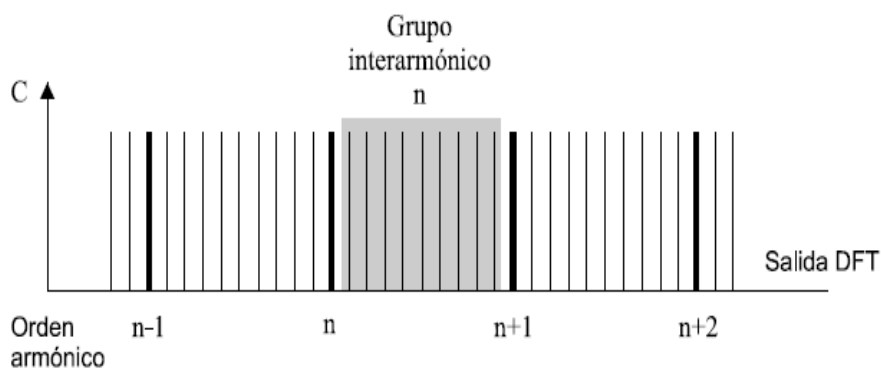


Figura 1.11 Líneas espectrales del grupo interarmónico [24].

1.8.3.9 Evaluación de las emisiones de armónicos desde 2 kHz hasta 9 kHz

Para medir estas componentes no requerimos de una alta resolución en el dominio de la frecuencia. Por lo que es frecuente reagrupar la energía la señal para realizar su análisis en bandas de frecuencia predeterminadas. Se fija en 200 Hz el ancho de banda para reagrupar estas emisiones, se ubica la frecuencia la central del primer posible grupo en 2,1 kHz.

Se recomienda la selección de una frecuencia de muestro tomando en cuenta las reglas establecidas para el análisis de señales, para la medición de las componentes de frecuencia hasta 9 kHz. En este tipo de análisis, el muestro necesariamente no tiene que ser en sincronía o sincronizado con respecto al periodo la componente fundamental de la red. Para la adquisición de datos se recomienda el uso de una ventana rectangular de ancho 100 ms, esto se corresponde con el equivalente de cinco periodos de la componente fundamental. Como resultado el intervalo de frecuencia que se toma entre dos componentes consecutivas medidas es 10 Hz [4].

El resultado de la DFT, (Salida 1 en la figura 1.6), es reagrupado en bandas 200 Hz (se puede observar en la figura 1.12), se comienza por la primera banda central que tiene un valor mayor que el orden de los armónicos. Se corresponde G_b de cada banda al valor eficaz que se calcula con la ecuación siguiente:

$$G_b = \sqrt{\sum_{f=b-90(Hz)}^{b+100} C_f^2} \quad (11)$$

Donde: La frecuencia central b toma valores: 2,1 kHz, 2,3 kHz, 2,5 kHz, de 200 Hz en 200 Hz, hasta tomar como último valor de frecuencia 8,9 kHz.

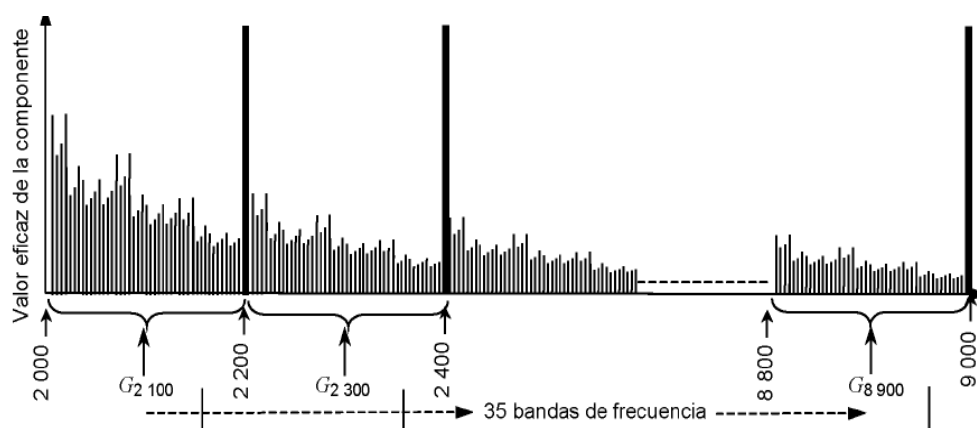


Figura 1.12: Ilustración de las bandas de frecuencia para las medidas en el margen de 2 kHz a 9 kHz [4].

1.8.4 Norma UNE-EN 61000-4-30

1.8.4.1 Objeto y campo de aplicación

En esta sección de la Norma UNE-EN 61000 se definen métodos para la medida y como interpretar los resultados de los parámetros de calidad establecidos para las redes de suministro de energía eléctrica cuya frecuencia fundamental es 50 Hz o 60 Hz.

La medición de los parámetros que cubre esta Norma es limitada a los fenómenos que ocurren en una red de energía eléctrica. Se consideran en esta norma como parámetros de calidad de suministro a los huecos de tensión y las sobretensiones, la frecuencia, el flicker, el desequilibrio de tensión, la amplitud de la tensión de alimentación, las interrupciones de tensión, los armónicos e interarmónicos, las tensiones transitorias, las variaciones rápidas de tensión, las señales de transmisión por la red y las medidas de corriente [32]. Se definen dos clases, A y S, en esta norma para cada parámetro que se mide. Se establece para cada clase sus métodos propios de medición y los requisitos adecuados de características.

- Clase A

Esta clase es utilizada cuando se requieren mediciones muy exactas, un ejemplo de esto puede ser, resolución de litigios producto de aplicaciones contractuales, cuando se verifica la conformidad con las normas, entre otras. Según lo que establece la norma si se realizan mediciones de un parámetro con dos instrumentos diferentes pero que cumplan con los requisitos mínimos correspondientes a la Clase A, los resultados arrojados deben ser concordantes dentro del margen incertidumbre que se especifica.

- Clase S

Se utiliza esta clase en aplicaciones de estadística como por ejemplo en la evaluación de evaluación de campañas de medida de la calidad de suministro. Para esta Clase se definen requisitos de procesamiento menores que los de la Clase A, sin embargo los intervalos de medición son los mismos. Se utiliza para realizar estudios de evolución de la calidad de suministro en el interior de un edificio o en un solo lugar durante un determinado periodo de tiempo, o inclusive en el interior de una sola parte del equipo.

- Clase B

Se agrega de modo informativo la Clase B. Los nuevos instrumentos de medida deben de ser diseñados para cumplir con los requisitos de la Clase A y S. La Clase B es empleada para instrumentos de medida tradicionales que se encuentren en uso actualmente.

1.8.4.2 Organización de las medidas

La norma plantea que en el caso de redes de baja tensión la magnitud eléctrica puede ser medida directamente, o puede accederse a esta mediante el uso de transductores de medida. La figura 1.13 muestra completa la cadena de medida.

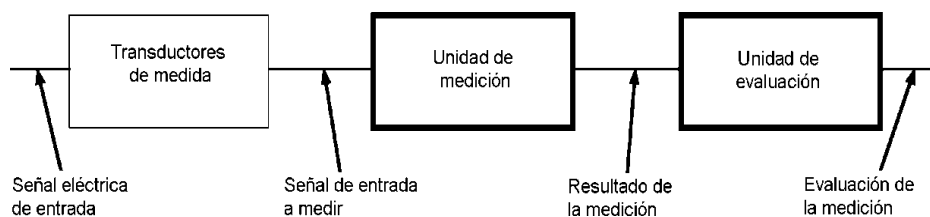


Figura 1.13. Cadena de medida [31].

✓ Agregación de mediciones en intervalos de tiempos

- Clase A

Se establece como intervalo básico para la medición de amplitudes de los parámetros (interarmónicos, armónicos, tensión de la red y desequilibrio) debe de ser de 10 periodos para una red de suministro de 50 Hz o de 12 períodos para una red de suministro de 60 Hz. Se agregarán después los valores de 10 o 12 períodos sobre 3 intervalos adicionales:

- ✓ Se establece un intervalo de 150 períodos para una frecuencia nominal de 50 Hz;
- ✓ Se establece un intervalo de 10 minutos;
- ✓ Se establece un intervalo de 2 horas para el flicker.

- Clase S: Se utilizan los mismos intervalos de tiempo que en la Clase anterior.

1.8.4.3 Parámetros de calidad de suministro

La norma define las bases para la evaluar los diferentes parámetros de la calidad de suministro de una red de suministro dígase: frecuencia industrial, amplitud de la tensión de suministro, flicker, huecos y sobretensiones, interrupciones de la tensión de suministro, tensiones transitorias, armónicos de tensión, entre otros. Para los armónicos de tensión nos dice que la medición de los mismos se realizara según lo establecido en la norma UNE-EN 61000-4-7.

1.8.5 NORMA UNE-EN 61000-3-2

Esta sección de la UNE-EN 61000 establece los límites de las corrientes armónica que pueden ser introducidas al sistema de suministro público.

A su vez establece los límites de componentes armónicos de la corriente a la entrada que pueden producirse por equipos testeados en condiciones particulares.

Se aplica a equipos electrónicos y eléctricos que poseen una corriente de entrada nominal menor o igual a 16 A por fase, que hayan sido diseñados para conectarse a redes de suministro de baja tensión.

Es aplicable a equipos eléctricos y electrónicos que tienen una corriente de entrada nominal de hasta 16 A por fase e inclusive. Se clasifica al equipo en 4 clases en lo referente a limitación armónica:

- De la clase A podemos citar los siguientes ejemplos:
 - equipo trifásico equilibrado;
 - electrodomésticos, se excluyen los que pertenecen a las clases B, C o D;
 - aspiradoras;
 - limpiadores de alta presión;
 - herramientas, excepto herramientas portátiles;
 - reguladores de control de fase independientes;
 - equipo de sonido;
 - Luminarias profesionales para iluminación de escenarios y estudios.
- Clase B:
 - herramientas portátiles;
 - equipos de soldadura por arco que no sean equipos profesionales.

➤ Clase C:

- equipos de iluminación.

➤ Clase D:

Equipos cuya potencia es igual o menor que 600 W, de las siguientes categorías:

- ordenadores personales y monitores de ordenadores personales;
- receptores de televisión;
- *“refrigeradores y congeladores que tienen uno o más accionamientos de velocidad variable para controlar los motores del compresor” [3].*

Se considerará como equipo perteneciente a la Clase A todo aquel que no

haya sido especificado en las categorías de las Clases B, C o D [3].

1.8.5.1 Límites de los armónicos para equipos de Clase A y B

Se establecen los límites de los armónicos de la corriente de entrada en los valores dados en la Tabla 1.9, para equipos de la Clase A. En el caso de los de Clase B, sus límites serán los valores de la Tabla 1.9 multiplicados por el factor numérico 1,5.

1.8.5.2 Límites de los armónicos para equipos de Clase C

En el caso de luminarias que poseen lámparas incandescentes (bombillos) y una atenuación de control de fase integrada cuya potencia nominal es superior a 25 W, los límites de los armónicos de la corriente de entrada son los establecidos en la Tabla 1.9.

Para otro tipo de equipo de iluminación que no sea el mencionado anteriormente y cuya potencia nominal sea superior a 25 W, se establecen como límites para los armónicos de la corriente de entrada los dados en la Tabla 1.10.

Deberán cumplir con los siguientes tres requisitos equipos de iluminación cuya potencia nominal sea mayor o igual a 5 W, también aquellos cuya potencia sea menor o igual a 25 W:

Los valores de las corrientes armónicas no deberán superar los límites vinculados con los valores de potencia de la columna 2 de la tabla 1.11.

- Los valores de corriente armónica para el armónico de tercer orden, no superará el 86 % con respecto al valor de la corriente fundamental, para la corriente armónica del armónico de orden quinto no superará el 61 %. Además la forma de onda de la corriente de entrada será el indicado en la figura 1.14 en color azul, donde alcanzara su valor máximo a 65° o un poco antes, tomara valores del 5% entre 0° y 60°, volverá a tomar valores de 5 % de su valor máximo antes de 90°. Se considera el valor umbral actual al 5 % del valor máximo absoluto que se obtiene durante la ventana de medición. Se realizan las mediciones del ángulo de fase durante el ciclo que incluye el valor máximo absoluto. No influirán en la evaluación componentes de frecuencia cuyo valor sea superior a 9 kHz.

El valor del THD no superará el 70 %. Los valores de corriente para el armónico de tercer orden, no superará el 35 % con respecto al valor de la corriente fundamental, para la corriente del armónico de orden quinto no superara el 25 %, la corriente del armónico de orden séptimo no superara el 30 %, la corriente del armónico del noveno y undécimo orden no superaran el 20 %, la corriente del armónico de orden segundo no superará el 5 %.

1.8.5.3 Límites de los armónicos para la Clase D

Las corrientes armónicas no deberán sobrepasar los valores mostrados en la tabla 1.11 para los equipos de la Clase D.

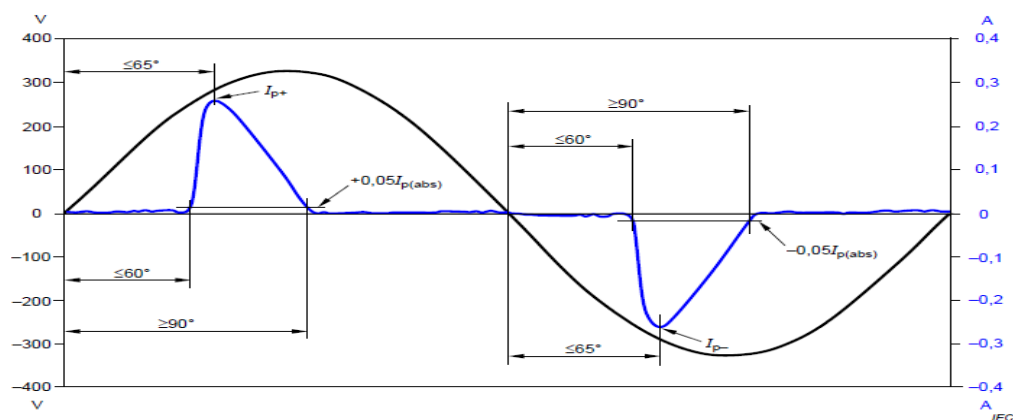


Figura 1.14: Ilustración del Angulo de fase relativo y parámetros de corriente para valores de potencia ≥ 5 W y menores que ≤ 25 W [3].

Tabla 1.9: Límites para equipos de Clase A [3].

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible A
Armónicos impares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Armónicos pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

Tabla 1.10: Límites para equipos de Clase C [3].

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental %
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	3

* λ es el factor de potencia del circuito.

Tabla 1.11: Límites para equipos de Clase D [3].

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible por vatio mA/W	Corriente armónica máxima admisible A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	$\frac{3,85}{n}$	Véase tabla 1

1.9 Referencias del capítulo 1

- [1] Exxon Mobil. "Outlook for energy: a perspective to 2040". (2019).
- [2] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales". IEEE Latin America Transactions, Vol 3, No. 5, December 2005.
- [3] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN IEC 61000-3-2:2019 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)". (2019).
- [4] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 61000-4-7:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM) Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas". (2004).
- [5] <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.
- [6] <https://www.scopus.com/home.uri>.
- [7] <https://www.engineeringvillage.com/home.url>.
- [8] E. O. A. Larsson, C. M. Lundmark and M. H. J. Bollen, "Measurement of current taken by fluorescent lights in the frequency range 2-150 kHz", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/PES.2006.1709417.(2006).
- [9] A. F. Barbosa, L. A. Noguera y W. M. Giral, "Análisis de distorsión armónica en iluminación LED". Revista Vínculos, vol 14, no 2, julio-diciembre 2017, 95-107. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.12520>.
- [10] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in IEEE Std 519-2014 (s. f.). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>,
- [11] Putz, & Bednarek, & Nawrowski. "Disturbances Generated by Lighting Systems with LED Lamps and the Reduction in Their Impacts". Applied Sciences. 9. 4894. 10.3390/app9224894. (2019).
- [12] Pourarab, Morteza & Nakhodchi, Naser & Monfared, Mohammad. "Harmonic Analysis of led street Lighting According to IEC61000-3-2; a Case Study". 23rd International Conference on Electricity Distribution. June 15-18, 2015. Lyon. . (2015).
- [13] Larsson, Anders & Lundmark, C. & Bollen, Math. "Distortion of Fluorescent Lamps in the Frequency Range 2-150 kHz". submitted to ICHQP, October 2006, Cascais, Portugal. (2006).

- [14] Salih, Salih & Abid, kaleid waleed & Nayef, Munther. "Practical Analysis of Harmonics Effects on Transformer". Elixir Renewable Energy Engg. 70. 24362-24367. (2014).
- [15] H. Farooq, C. Zhou, M. E. Farrag and M. Ejaz, "Investigating the Impacts of Distributed Generation on an Electrical Distribution System Already Stressed by Non-Linear Domestic Loads". Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307367. (2012).
- [16] Rea, Judith & Herring, Jack & Sopoćko, Michał & Dempsey, Paul & Armstrong, Sara. "Survey on demand side sensitivity to power quality in Ireland". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 83. 495-504. 10.1016/j.ijepes.2016.04.003. (2016).
- [17] Greverer, Anne & Meyer, Jan & Rönnberg, Sarah & Bollen, Math & Myrzik, J.M.A. "Survey of supraharmonic emission of household appliances". CIRED - Open Access Proceedings Journal. 2017. 870-874. 10.1049/oap-cired.2017.0458. (2017).
- [18] Ruiz Vallejo, J. M; Ortiz Quintero, F. H. "Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos". Rios Porras, C.A (dir). Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira. (2007).
- [19] P. Ferracci. "La calidad de la energía eléctrica". Schneider Electric España S.A, Cuaderno Técnico nº 199. (2001).
- [20] Gutierrez Iglesias, J.; Bartak, G. "Power Quality in European Electricity Supply Networks - 1st edition". Union of the Electricity Industry-EURELECTRIC. (2002).
- [21] <https://es.scribd.com/presentation/122682899/NORMATIVA-50160>
- [22] Pinyol, R. "Harmonics: Causes, effects and minimization". Salicru White Papers. (2015).
- [23] <https://es.scribd.com/document/376410766/255331062-Cargas-No-Lineales>.
- [24] Diego García, R. I. "Análisis Wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica". Barros Guadalupe, J. (dir). Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria. (2006).
- [25] Fernandez Falleto, F. J; Toledo Arevalo, R. A. "Estado del arte en metodologías para el análisis de flicker y su relación con los interarmónicos". Delgado Navarro, J.C (dir). Trabajo de Grado, Universidad del Bio-Bio. (2010).
- [26] Fernández Moreno, J. "Teoría de circuitos: Teoría y problemas resueltos". Paraninfo. (2011).
- [27] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 50160: 2011 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". (2011).

[28] <https://es.scribd.com/document/251205865/Perturbaciones-de-Tension-Norma-en-50160>.

[29] Sayings, W. "Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems. (2014).

[30] Mendoza Aguirre, T. V. "Evaluación de la THDI y THDV en transformadores de distribución monofásicos". Carrión González, J.E.(dir). Tesis de Grado. Universidad Nacional de Loja. (2019).

[31] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 61000-4-30:2015 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro". (2015)

2. Desarrollo de un instrumento virtual de medida conforme a UNE-EN 61000-4-7

En este capítulo describimos el trabajo experimental realizado durante el desarrollo del TFM. Hemos diseñado e implementado en un laboratorio de Electrónica un banco de pruebas para medir las componentes espectrales de la señal de corriente de una carga eléctrica/electrónica así como las componentes espectrales de la señal de tensión de la red que alimenta dicha carga. Posteriormente, empleando este banco de pruebas, hemos obtenido medidas experimentales con tres cargas cuantiosamente presentes en entornos residenciales, empresariales e industriales.

2.1 Instrumento de medida de UNE-EN 61000-4-7

En este capítulo presentamos el instrumento virtual desarrollado para la toma de muestras de las señales y su análisis espectral.

Nuestro propósito fundamental en el presente trabajo es realizar un instrumento de medida para el análisis de armónicos e interarmónicos, aplicable a la red de suministro y los aparatos conectados a ella. Para ello nos basaremos en el esquema de la estructura general del instrumento que se propone en UNE-EN 61000-4-7 [1]:

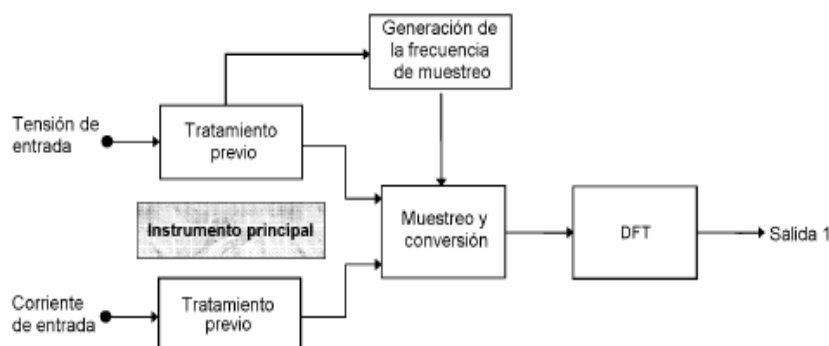


Figura 2.1: Estructura general del instrumento de medida según Norma UNE-EN 61000-4-7 [1].

Bajo este esquema general el instrumento adquiere muestras de la señal de tensión y de la señal de corriente de la red eléctrica de forma sincronizada con esta. Posteriormente realiza el análisis espectral de estas señales mediante la Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) aplicando el algoritmo Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT).

Nuestro objetivo fundamental será verificar que determinados equipos eléctricos y electrónicos que vamos a someter a estudio, el EUT (Equipment Under Test), conectados a la red de distribución de energía eléctrica, cumple con los límites de emisión de corriente establecidos en la Norma UNE-EN 61000-3-2 [2], teniendo en consideración la clase a que pertenece cada EUT.

2.2 Instrumento de medida implementado

El instrumento de medida de UNE-EN 61000-4-7 constituye un esquema conceptual de cómo debe ser nuestro instrumento de medida, el cual puede tener diferentes implementaciones físicas. A continuación, describiremos la implementación que nosotros hemos realizado con la finalidad que nos hemos marcado en este proyecto.

Hemos desarrollado un instrumento formado por hardware y software. La parte hardware está formada por un circuito que incluye sensor y acondicionador de señal y por otra parte por una tarjeta de adquisición de datos controlada desde un computador personal, PC. Este computador ejecuta la parte software la cual es un instrumento virtual que controla la tarjeta de adquisición de datos, gestiona y almacena las muestras de las señales adquiridas y analiza estas muestras para producir la información buscada.

- Hardware:
 - Sensor y acondicionador de la señal (transductores de medida).
 - Tarjeta de adquisición de datos y PC.
- Software: Instrumento Virtual de Labview para el procesado y análisis de la Señal.

Con este instrumento vamos a tomar medidas de la red eléctrica y vamos a caracterizar tres cargas de uso común en entornos doméstico y de oficina:

- un cargador de móvil,
- Lámpara fluorescente.
- Monitor de PC de sobremesa.

2.3 Sensor y circuito acondicionador de señal

En nuestro proyecto mediremos la señal de tensión de la red eléctrica y la señal de intensidad presente en la carga en respuesta a esa señal de intensidad de la red. Los describimos a continuación:

2.3.1 Sensor de tensión. Transductor LEM LV25-P

Para la medida de la señal de la red eléctrica en baja tensión utilizamos un transductor de tensión. Este transformador realiza una conversión intensidad-intensidad entre el primario y el secundario. Mediante resistencias conectadas en el primario y en el secundario del transformador convertiremos la señal de tensión del primario en una señal de tensión en el secundario.

Los valores de estas resistencias deben ser adecuados para disipar la potencia de la señal de la red eléctrica en el primario del transformador y atenuar la tensión a niveles admisibles por la tarjeta de adquisición de datos conectada en el secundario.

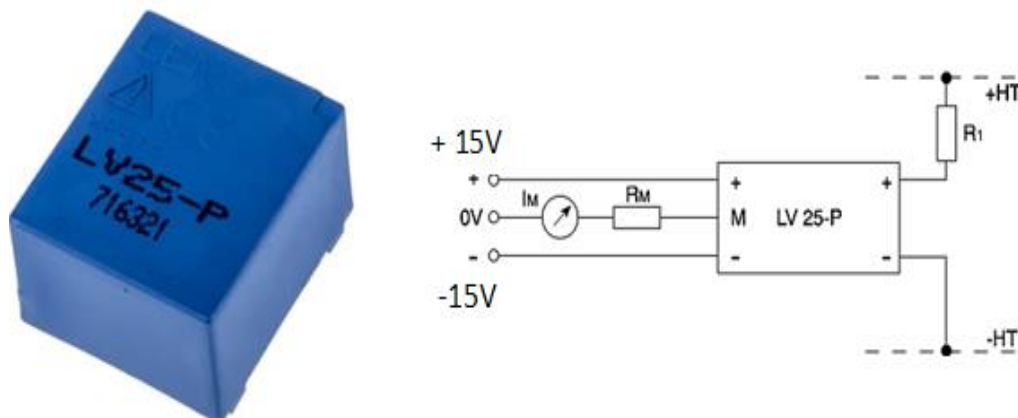


Figura 2.2. Imagen y esquema de conexión del LEM LV25-P [3].

En la figura 2.2 las resistencias R_1 y R_M constituyen la resistencia de disipación y de medida respectivamente. En la figura, +HT y -HT son los puntos de conexión del primario del transductor a la RED eléctrica [3].

El transformador de medida está basado en el efecto Hall, para medida de intensidad de corriente en circuitos eléctricos con aislamiento galvánico entre primario y secundario que permite la medida de corrientes continuas, alternas e impulsos. Sus características principales se resumen a continuación:

- ✓ IPN (corriente nominal en primario rms): 10 mA.
- ✓ VPN (tensión nominal en primario): 10 a 500 V.
- ✓ Rango de medida de corriente en primario: 0 a ± 14 mA.
- ✓ ISN (corriente nominal secundario rms): 25 mA.
- ✓ KN (ratio de conversión): 2500:1000.
- ✓ Vcc (tensión de alimentación): ± 12 a ± 15 V.

2.3.2 Sensor de corriente. Transductor LEM LA25-NP

El LA25-NP de LEM es un transductor de corriente de circuito cerrado que utiliza tecnología de efecto Hall, para la medición de corrientes de valores rms 5 A, 6 A, 8 A, 12 A y 25 A. Cuenta con salida instantánea, precisión de ± 0.5 %, muy buena linealidad (± 0.2 %), baja desviación de temperatura, tiempo de respuesta optimizado, ninguna pérdida por inserción, alta inmunidad a interferencia externa y capacidad de soportar sobrecarga de corriente [4].

Este transductor de corriente se utiliza para la medición electrónica de corrientes (DC, AC, pulsada, mixta) con separación galvánica entre el circuito primario y el circuito secundario. Convierte la corriente primaria una corriente reducida proporcional secundaria, para que pueda ser procesada por un instrumento.

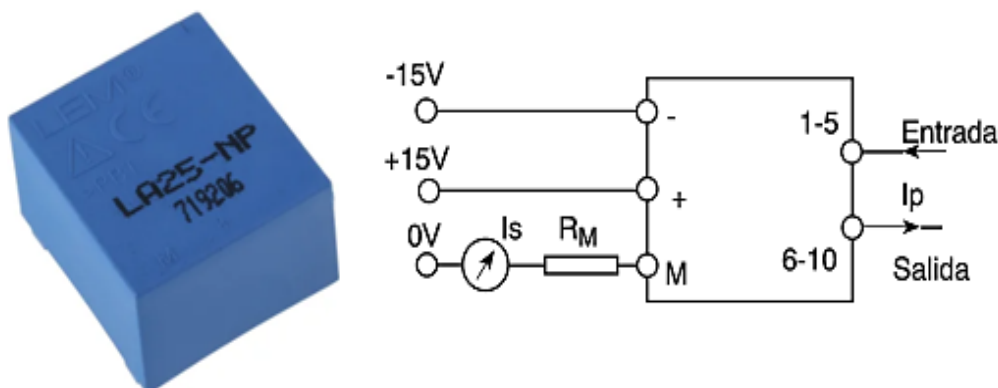


Figura 2.3: Imagen y esquema de conexión del LEM LA25-NP [4].

El LEM posee 5 configuraciones según su datasheet en dependencia de las necesidades del usuario, esto se establece con los pines del 1 al 10. R_M es la resistencia de detección en el terminal M utilizada para convertir la corriente del terminal M en un voltaje sensible.

Características fundamentales del mismo:

- ✓ Transductor de corriente de bucle cerrado que utiliza tecnología de efecto Hall.
- ✓ Corriente nominal primaria de 25 A.
- ✓ Corriente nominal secundaria rms de 25 mA.
- ✓ Precisión del 0,5 % a Temperatura de operación 25°C.
- ✓ Tensión de alimentación de ± 15 V.
- ✓ Tiempo de respuesta $< 0,2 \mu s$.
- ✓ Relación de conversión de 1-2-3-4-5: 1000.
- ✓ Rango de temperatura de operación de -40°C a 85°C.
- ✓ Rango de Medida de Corriente AC: -36 A a 36 A.
- ✓ Montaje en PCB.

2.3.3 Fuente de alimentación de los transductores

Los transductores LV25-P y LA25-NP descritos requieren ser alimentados para su funcionamiento. Para ello emplearemos una fuente DC marca Philips modelo PE 1542. Esta es una fuente de alimentación estabilizada para alimentar y testear circuitos eléctricos y electrónicos. Este equipo proporciona tres voltajes de salida los cuales están galvánicamente separados. La regulación de cada salida es lograda a través de varias etapas reguladoras basadas en transistores dispuestas en serie [5].

Con este equipo, para un voltaje de entrada AC de 110 V, 127 V, 220 V, 240 V ± 10 % por posibles variaciones, podemos obtener valores en sus salidas I y II entre 0 V y 20 V y entre 0 V y 7 V en la salida III.



Figura 2.4. Fuente de alimentación Philips PE 1542.

2.3.4 Circuito de acondicionamiento para la señal de tensión

Para la medida de la señal de la red eléctrica en baja tensión utilizamos el LEM LV25-P. Los valores de estas resistencias se seleccionan con valores adecuados para, en el primario del transformador disipar la potencia de la señal de la red eléctrica y en el secundario atenuar la tensión a niveles admisibles para la tarjeta de adquisición de datos.

✓ Resistencia en el primario del transformador

Para el diseño del sistema de medida, en principio, podemos considerar que la señal de la red eléctrica es una señal sinusoidal que tiene un valor nominal de 230 V de valor rms, es decir, amplitud 325 V aproximadamente. Sin embargo debemos tener en cuenta que ocasionalmente se producen sobretensiones en esta señal que pueden provocar que se supere el rango admisible en la entrada de la tarjeta de adquisición de datos conectada en el secundario del transformador y en consecuencia que esta resulte dañada. Por tanto, consideraremos por precaución que la señal de la red eléctrica puede alcanzar 350 V de valor rms, es decir, 495 V de amplitud aproximadamente.

Por otro lado, consideraremos que el rango máximo admisible en la entrada de la tarjeta de adquisición de datos es ± 10 V, el cual es un rango típico admitido por multitud de sistemas de adquisición.

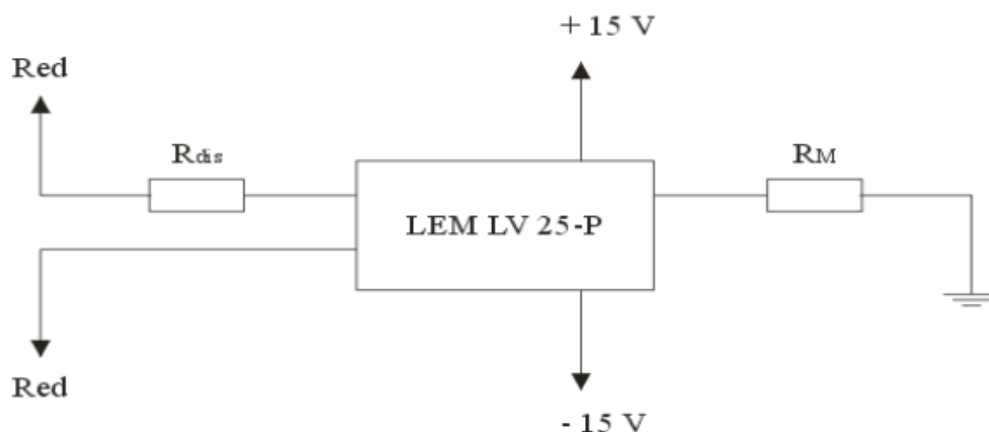


Figura 2.5. Circuito acondicionador de la señal de tensión.

La resistencia de disipación, R_{dis} , se coloca entre uno de los terminales de salida de red y el primario del transformador. Es una resistencia de alta disipación ya que debe resistir tensiones del orden de cientos de voltios. Utilizamos una resistencia de valor 50 k Ω . De este modo, la intensidad de corriente de primario del transformador es:

$$I_p = \frac{350V_{rms}}{50\text{ k}\Omega} = 7\text{ mA rms}$$

De este modo la corriente de entrada del primario del transformador tiene un valor máximo por debajo del límite superior de 14 mA que puede llegar a admitir. De acuerdo con la figura, en el secundario del transformador, realizaremos la toma de muestras entre los extremos de la resistencia de medida, R_M . Utilizaremos una resistencia de precisión que se caracteriza, gracias a su proceso de fabricación, por alta precisión de su valor resistivo y baja variación de este valor resistivo por motivo de la disipación de calor durante su funcionamiento.

✓ *Resistencia en el secundario del transformador*

Para la elección del valor de la resistencia de medida R_M , debemos tener en cuenta que la relación entre las intensidades de corriente entre primario y secundario es 2.5, de acuerdo con la relación de espiras 2500:1000 indicada por el fabricante. En consecuencia, la intensidad de corriente en el secundario del transformador, I_s será de 17.5 mA de valor rms para la corriente calculada de 7 mA de valor rms.

Si tomamos una, R_M de 0.402 k Ω , para esta I_s tendremos una señal de amplitud máxima de 7.035 V de valor rms correspondientes a una amplitud máxima de 9.95 V. De este modo todas las situaciones en las que la tensión en la red eléctrica sea inferior a 350 Vrms, casi 500 V de amplitud, ocasionarán una amplitud en R_M y por lo tanto en el canal de entrada de la tarjeta de adquisición de datos, inferior a su valor límite admisible de 10 V.

Según nos plantea la norma UNE-EN 61000-4-7 textualmente “*el circuito de entrada del instrumento de medida debe ser adecuado para la tensión máxima y la frecuencia de la red de suministro a analizar y debe mantener sus características y su precisión*”

invariables hasta 1,2 veces esa tensión máxima. Para las medidas es suficiente un factor de cresta de al menos 1,5". Con los valores propuestos para las resistencias se garantiza que el valor factor de cresta es superior a 1,5. Una vez conectados estos elementos la apariencia del subsistema acondicionador de señal se muestra en la figura 2.6.

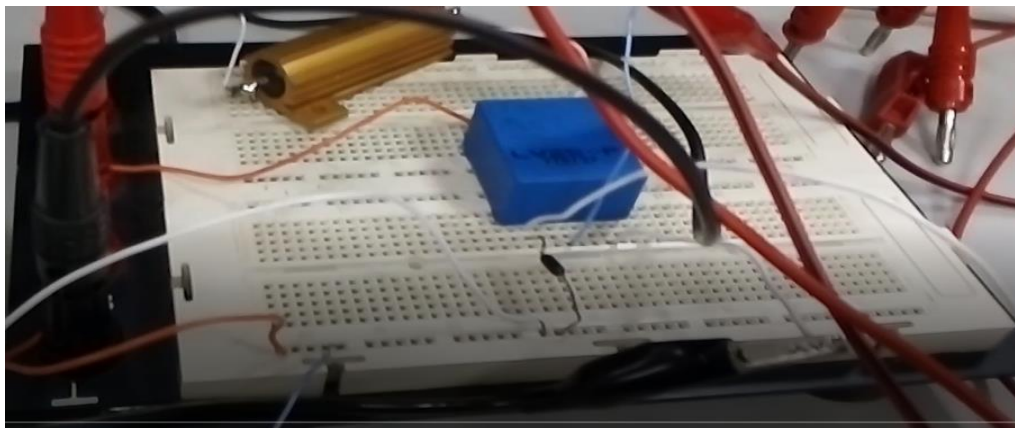


Figura 2.6. Montaje de laboratorio del circuito acondicionador de señal.

Para el análisis de las muestras en el computador, este debe multiplicarlas por el valor inverso de la atenuación introducida en el circuito de acondicionamiento de la señal para así tener los valores originales de la tensión de la red eléctrica.

$$\text{Factor de multiplicación} = \frac{230 V_{rms}}{4.623 V_{rms}} = 49.35$$

Este factor de conversión lo hemos introducido en el software del instrumento virtual que procesa las muestras de la señal de la tensión de la red.

2.3.5 Circuito de acondicionamiento para la señal de intensidad

Para la medida de la señal de corriente que circula a través de nuestro equipo bajo prueba (EUT) como ya hemos expuesto utilizamos el LEM LA25-NP.

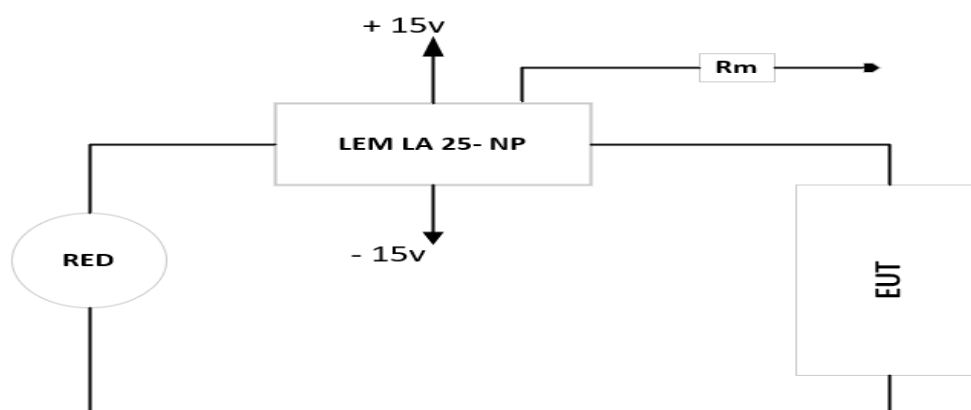


Figura 2.7: Circuito acondicionador de señal para la medición de la corriente.

Para configurar el transductor de acuerdo con su datasheet debemos fijar dos parámetros importantes: el valor de R_M y la configuración de las pines del transductor.

Los EUT que utilizaremos no son de mucho consumo de potencia, aplicando ley de Ohm, con un voltaje aplicado de 220 V de valor rms la corriente que circularía por nuestro circuito no superaría un valor de 5A. Teniendo en cuenta lo anterior, seleccionamos un valor de $R_M = 277,7 \Omega$ empleando resistencias de valores 177,7 Ω y 100 Ω , conectadas en serie. Respecto de la configuración de los pines del transductor utilizaremos la siguiente:

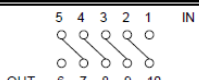
Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_p [m Ω]	Primary insertion inductance L_p [μ H]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_p [A]					
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	

Figura 2.8: Sección de la tabla de configuración de LEM LA 25–NP [4].

Con esta configuración garantizamos que la corriente máxima que circulara por nuestra resistencia de medida R_M sea de 25mA, debido a que la relación K_n será de 1/200. En otras palabras el valor de I_s estará determinado por la ecuación:

$$I_s = I_p / 200$$

Según nos plantea la norma UNE-EN 61000-4-7 textualmente “*el consumo del circuito de entrada de corriente no debe exceder de 3 VA para la instrumentación de clase II. Para la instrumentación de clase I, la caída de la tensión de entrada en valor eficaz no debe exceder de 0,15 V*”. También se exige que “*el margen de sensibilidades apropiadas del circuito de entrada se extiende de 0,1 V a 10 V*”. Esto se garantiza ya que la tensión no cae 0,15 V a la entrada del transformador de medida y nuestro transductor de medida nos suministra salidas en rangos de diferentes valores posibles, entre ellos el de ± 10 V, que es el rango en la resistencia de medida.

En conclusión, con nuestro circuito de acondicionamiento se garantiza que cumpla con este requisito para ser considerado de Clase I o Clase II.

La siguiente figura muestra el montaje del circuito del transductor, para que pudiera apreciarse las conexiones la imagen muestra el transductor de cara y también de cruz.

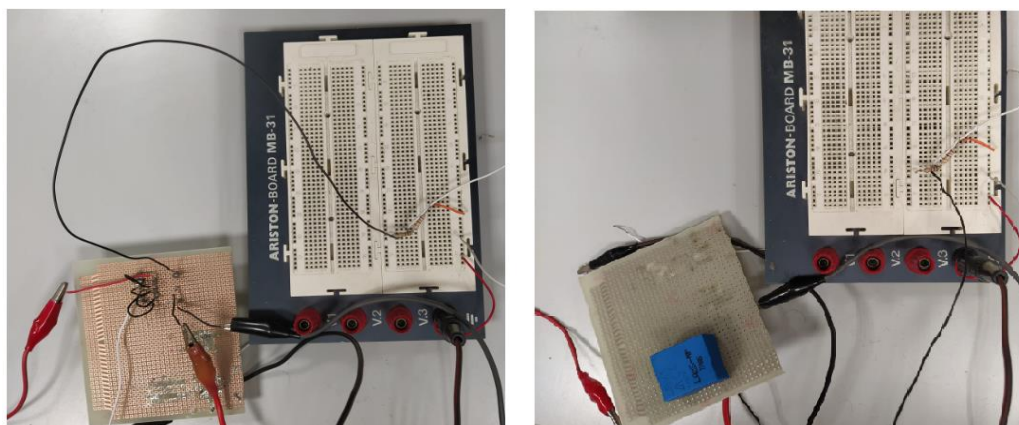


Figura 2.9: Montaje de laboratorio del circuito acondicionador de señal de corriente.

2.4 Tarjeta de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos (data acquisition o DAQ) se utilizan como puente entre el mundo digital y el analógico. La adquisición de datos es el proceso de medición, a través de un computador o procesador digital en general, de una magnitud física como temperatura, tensión, corriente, sonido o presión.

Este proceso es continuamente utilizado en laboratorios de investigación por ingenieros y científicos, fundamentalmente para la realización de pruebas y mediciones, pero también para la automatización en diversas áreas de la industria.

Generalmente, los sistemas DAQ son los más adecuados para medición de señales de tensión y corriente. A través de los transductores o sensores se adquieren los datos de la variable para su posterior procesamiento. No obstante, estas señales que se obtienen a la salida de los transductores o sensores se deben de acondicionar antes de que sean adquiridas por el sistema digital para procesarlas posteriormente en el computador. Debido a la gran variedad de parámetros y señales que pueden ser muestreados y almacenados, existe una grandísima variedad de sistemas DAQ.

La función principal de un hardware DAQ es servir como interfaz entre las señales de un entorno físico y un computador, digitalizando las señales analógicas que recibe para que un computador pueda interpretarlas. Un dispositivo DAQ que se usa para medir una señal cualquiera posee tres componentes fundamentales: un bus de PC, un convertidor analógico-digital (ADC) y un circuito de acondicionamiento de señales. Existen dispositivos DAQ que poseen otras funcionalidades para automatizar sistemas de medidas y procesos; ejemplo de estos son los convertidores digitales-analógicos (DACs), generadores de señales analógicas, contadores/temporizadores para realizar conteos y generar pulsos digitales, o las líneas de entrada/salida (E/S) digital que reciben y envían señales digitales [6].

Un sistema DAQ incluye muchos componentes diferentes, como enlaces de comunicación, sensores, computadoras, procesadores de señal, software de

adquisición de datos, bases de datos, etc. Para realizar una tarea de adquisición correctamente la totalidad de estos componentes deben de operar coordinadamente [25]. Como sistema DAQ vamos a utilizar una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD).

Para escoger nuestra Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) nos centraremos en dos aspectos fundamentales: la velocidad de muestreo requerida y la resolución digital, o número de bits, en la representación de los valores muestreados.

2.4.1 Velocidad de muestreo

En un dispositivo DAQ la velocidad de muestreo se considera una de las características más importantes; esta es la velocidad máxima a la cual su ADC es capaz de muestrear una señal. Esta velocidad de muestreo deberá fijarse en un valor que depende de la componente espectral de máxima frecuencia de la señal muestreada que se está tratando de medir.

Es posible realizar el análisis y la reconstrucción de una señal de manera correcta si se muestrea al menos al doble de la frecuencia de la componente con la frecuencia más elevada presente entre las componentes de la señal, según nos indica el Teorema de Nyquist. No obstante, en la práctica se suele utilizar el criterio de muestrear al menos a una frecuencia diez veces superior a la máxima frecuencia de la señal con el objetivo de representarla digitalmente de forma muy detallada. Por lo tanto se recomienda utilizar un dispositivo DAQ con capacidad para muestreo al menos en un factor diez superior a la frecuencia de la señal a analizar, garantizando de este modo que se está midiendo o generando una representación precisa de la señal.

2.4.2 Resolución

El número de niveles binarios que puede utilizar el ADC en la representación de una señal constituirá la resolución del sistema en la digitalización. De este modo, el sistema DAQ solo puede diferenciar dos valores de la señal que se diferencien en una magnitud equivalente a la diferencia entre dos niveles de conversión.

Por ejemplo, empleando un ADC de 3 bits es posible representar 8 niveles de tensión. Con un ADC de 16 bits es posible representar 256 niveles de tensión discretas. En consecuencia, para un mismo rango de valores de la señal digitalizada, la diferencia del valor entre dos niveles consecutivos en el segundo caso es más pequeña y por tanto ofrece una resolución mejor.

Por otra parte, los dispositivos DAQ típicos tienen rangos de voltaje de ± 5 V o ± 10 V. Los niveles de voltaje que pueden ser representados son distribuidos uniformemente en todo el rango empleado. Por ejemplo, un dispositivo DAQ con un rango de ± 10 V y resolución de 12 bits, es decir 4,096 niveles de representación, puede detectar un cambio de $20 \text{ V} / 2096 = 0,00488 \text{ V}$, es decir aproximadamente 5 mV, mientras que un dispositivo con 16 bits de resolución, 65,536 niveles, puede detectar un cambio en la señal de $20 \text{ V} / 65536 = 0,000305 \text{ V}$ es decir unos 300 μV [7].

En las aplicaciones más habituales, los requisitos de resolución se pueden satisfacer con componentes ADC de 12, 16 o 18 bits.

2.4.3 Selección de la tarjeta de adquisición de datos

Para la realización de la parte experimental de este Trabajo Fin de Master, en el laboratorio disponíamos de dos modelos de tarjeta de adquisición de datos, ambas del fabricante National Instruments, para la implementación del instrumento de medida:

- El modelo NI USB-6009
- El modelo NI USB-6210

A la vista de las propiedades de ambas tarjetas mostradas en la tabla comparativa 2.1 nos decantamos por el segundo modelo por ser más completo y de características superiores.

Tabla 2.1. Características de las tarjetas de adquisición de datos NI USB6009 [8] y NI USB6210 [9].

Modelo NI USB-6009	Modelo NI USB-6210
8 canales de entrada analógica con resolución de 14 bits	16 canales simples u 8 canales diferenciales de entrada analógica con resolución de 16 bits
Frecuencia de muestreo máxima 48 kS/s.	Frecuencia de muestreo máxima 250 kS/s.
Configurable de ± 1 V a ± 10 V	Cuatro rangos de entrada programables (± 0.2 V, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V) por canal
1 contador digital de 32 bits y 5 MHz	2 contadores/temporizadores digitales de 32 bits y 80 MHz.

El NI USB-6210 es un módulo de adquisición de datos multifunción de la serie M alimentado por bus para USB que está optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo rápidas. El USB-6210 está diseñado específicamente para aplicaciones móviles o con limitaciones de espacio. La instalación plug-and-play minimiza la configuración y el tiempo de configuración, mientras que la conectividad directa de tornillo-terminal mantiene los costos bajos y simplifica las conexiones de señal. Es un producto que no requiere alimentación externa [9].



Figura 2.10: Modelo NI USB-6210.

A continuación resumimos otras características fundamentales además de las ya aportadas en la tabla 2.1, en la figura 2.11 se muestra el pin-out de la NI USB-6210:

- Precisión absoluta a escala máxima: 2,690 μ V.
- Alimentación mediante USB.
- Cuatro líneas de salida y cuatro líneas de entrada digitales compatibles TTL/CMOS.
- Compatible con Windows y Linux.
- Programable desde LabVIEW, C++ y Visual Basic entre otros
- Temperatura de operación de 0 to 45°C.

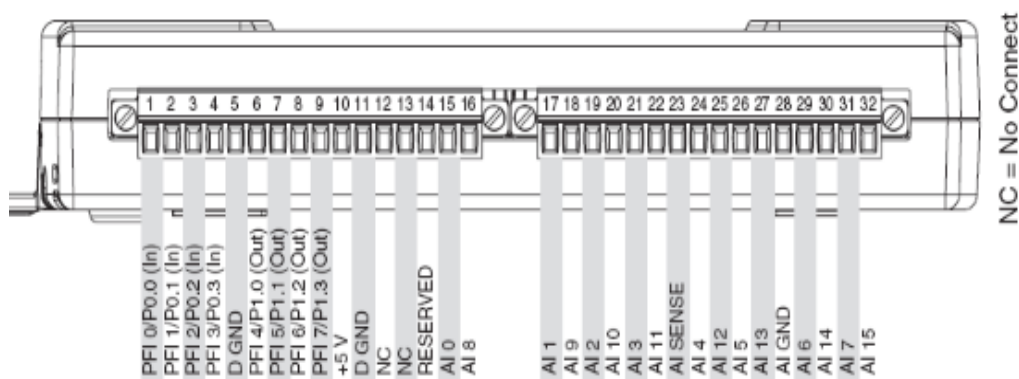


Figura 2.11: Pin-out de la DAQ 6210 [10].

2.5 Instrumento Virtual para procesamiento y análisis de la Señal

2.5.1 Computador

La tarjeta de adquisición de datos comunica los valores de las muestras adquiridas a un computador, en este caso un PC de sobremesa. Este tiene por función ejecutar un programa que controle la tarjeta durante el proceso de adquisición de datos, ejecutar el algoritmo de medida implementado para conocer los parámetros de la calidad del suministro eléctrico deseados, interactuar con el usuario y almacenar los resultados.

2.5.2 Entorno software para desarrollo de instrumentos virtuales

Para el desarrollo del software hemos utilizado el entorno de programación LabVIEW de National Instruments. Es un lenguaje de programación gráfica para aplicaciones de instrumentación que engloba control de hardware, adquisición y procesamiento de señal, creación de interfaces de usuario, almacenamiento de resultados, etc.

LabVIEW se emplea en el campo de la instrumentación para el desarrollo de aplicaciones de forma similar a los entornos de desarrollo que emplean lenguajes de programación de alto nivel de codificación tipo texto. A diferencia de ellos, LabVIEW se basa en elementos gráficos y diagramas formados por bloques interconectados que se comunican entre sí. El conjunto del software desarrollado con LabVIEW junto con el hardware controlado por ese software se denomina Instrumento Virtual (VI). La apariencia y funcionamiento de los instrumentos virtuales son como los de un instrumento físico con una funcionalidad concreta, pero utilizando un hardware general sin una funcionalidad específica. Con éste planteamiento se pueden diseñar diferentes VI con finalidades y funcionalidades muy distintas pero utilizando en todos ellos un mismo hardware de finalidad general. De este modo se reduce el tiempo de desarrollo así como la actualización y ampliación de aplicaciones específicas. Además, LabVIEW permite incluir código externo implementado en otros lenguajes de programación y hardware (sensores, sistemas de adquisición y módulos de conversión) de otros fabricantes.

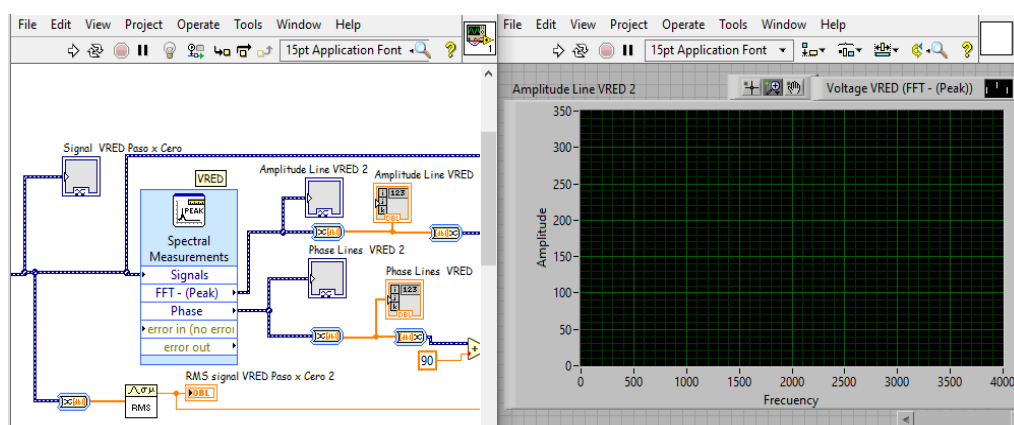


Figura 2.12: Panel frontal y diagrama de bloques de un VI.

Un VI ofrece al usuario un panel frontal software con el que puede interactuar que es equivalente al panel frontal hardware de un instrumento tradicional. El panel frontal está formado por controles e indicadores. Los controles sirven para que el usuario introduzca los parámetros que desea para el funcionamiento del VI (botones, diales, etc.), mientras que los indicadores muestran información (gráfica, displays numéricos, etc).

En el diagrama de bloques es donde se encuentra el código programado de la VI. En él se procesan todas las entradas y salidas relacionadas con el panel frontal y con el hardware, se ejecuta el algoritmo, se controla el hardware, etc.

El diagrama de bloques se construye a partir una librería de funciones: aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc. También se ofrece una biblioteca con estructuras (lazos for, while, case, entre otros) que son el equivalente a bucles o declaraciones causales en lenguajes de programación convencionales, las cuales ejecutarán el código que implementamos dentro de ellas de forma repetitiva o sujetos a una condición. En esta librería de funciones se incluyen otras VI ofrecidas por el fabricante.

2.5.3 Desarrollo de un instrumento virtual para la medida del espectro de acuerdo a la Norma UNE-EN 61000-4-7

La norma UNE-EN 61000-3-2 establece los límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada inferior o igual a 16 A por fase) y en su anexo A plantea como debe de ser la medición en los equipos especificando que los instrumentos de comprobación deben de cumplir con el estándar UNE-EN 61000-4-7.

A continuación abordaremos el diseño del software del instrumento virtual para la monitorización de las señales de tensión y de corriente.

Con nuestra primera monitorización tomaremos valores de la señal de la red de suministro eléctrico. Con la segunda monitorizaremos los parámetros de la corriente de las cargas, que posteriormente estudiaremos, además de verificar el cumplimiento de los límites de emisión armónica según lo establecido en [2].

Para el desarrollo de nuestro instrumento virtual deberemos implementar un diagrama de bloques que:

- Controle la tarjeta de adquisición de datos, teniendo en cuenta parámetros como la frecuencia de adquisición, los factores de atenuación en los sensores y los circuitos de acondicionamiento.
- Ejecute un algoritmo de análisis del espectro de la señal.
- Interactúe con el usuario atendiendo a los parámetros que desee fijar dentro del algoritmo de medida y muestre información sobre las señales y la magnitud de la señal monitorizada.
- Almacene resultados para posteriormente analizar el cumplimiento de las normas en el punto monitorizado a lo largo del tiempo.

En cuanto al panel frontal debe:

- Mostrar la información al usuario mediante indicadores gráficos y numéricos.
- Procesar las acciones del usuario sobre los controles que fijen valores en el algoritmo de análisis.

A continuación describiremos el desarrollo del diagrama de bloques y el panel frontal del VI. La figura 2.13 muestra una vista general del diagrama de bloques del VI.

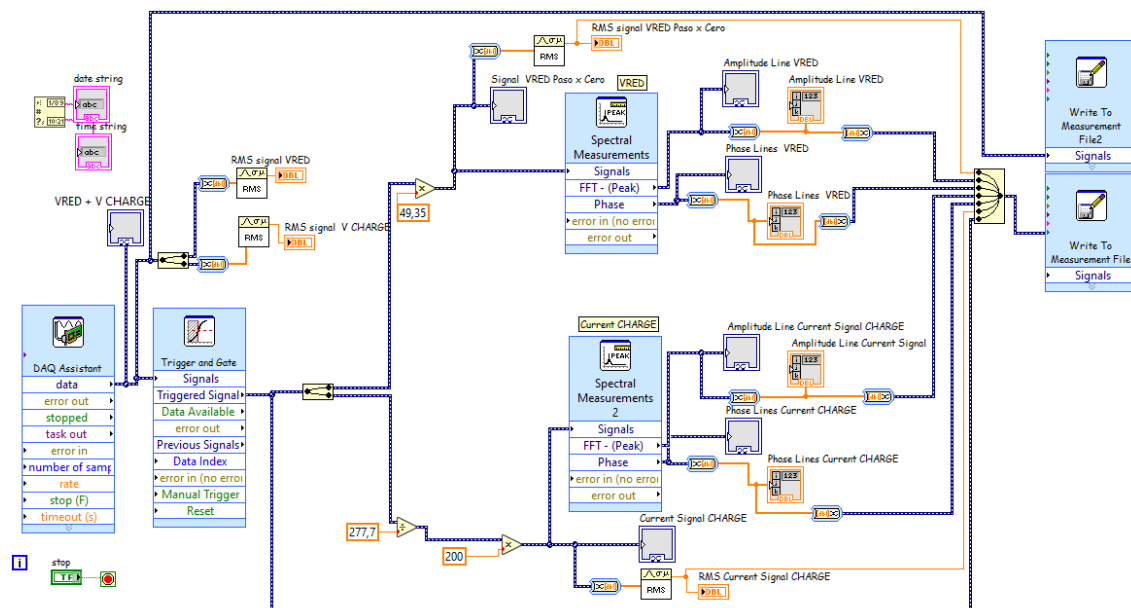


Figura 2.13. Diagrama de bloques del instrumento virtual.

Para adquirir las señales en los terminales de la tarjeta de adquisición de datos utilizaremos el bloque de función DAQ Assistant en el diagrama de bloques de nuestra VI. Este bloque de función está diseñado para crear, editar y ejecutar tareas de adquisición y generación de señal mediante un sistema DAQ en este caso la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6210.

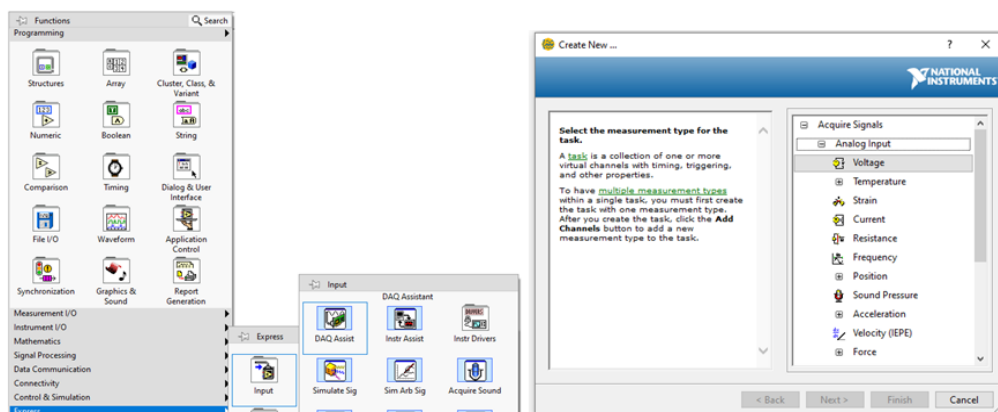


Figura 2.14: DAQ Assistant en la paleta de funciones y su interfaz de configuración.

Este bloque de función es un Express VI, un bloque de función que tiene su propio interfaz de configuración, mediante el cual se guía al programador en la creación de tareas tanto de adquisición como de generación de señal.

Al seleccionarlo y arrastrarlo hasta el diagrama de bloques automáticamente se abre una interfaz para la configuración de la adquisición de señal. Seleccionaremos la opción adquirir señal de tensión, a pesar de que tendremos una señal de corriente y una de tensión, recibiremos ambas en forma de tensión, luego aplicaremos ley de Ohm para obtener la señal de corriente que proviene de la monitorización de la carga.

En el pin-out de la tarjeta de adquisición de datos ya se habían cableado dos entradas analógicas, la primera es la señal de tensión de la red de suministro y la segunda es la señal de intensidad de la carga.

Además para la toma de muestras utilizaremos un PLL, con el objetivo de generar una señal de reloj que entre a la tarjeta de adquisición de datos para que la adquisición de muestras sea síncrona con la red eléctrica a pesar de que en esta se produjera una variación de frecuencia. Esto optimiza los resultados en el procesado de las señales. La salida de este equipo tomara una de las entradas digitales que posee la DAQ según indica la figura 2.11.

Realizamos la configuración de las dos señales de entrada que poseerá nuestra DAQ, realizaremos mediciones de un segundo, para cada una de nuestras cargas. Para realizar un análisis de la presencia de distorsión armónica hasta 2 kHz utilizaremos una frecuencia de muestreo de 8 kHz en el PLL.

Por otra parte, para analizar la presencia de distorsión armónica de 2 kHz a 9 kHz emplearemos una frecuencia de muestreo de 120 Hz. En este caso, la frecuencia de reloj no procederá del PLL, en este caso la señal del reloj será tomada de la RED. A continuación, en la figura 2.15 se muestra la configuración realizada en el bloque DAQ Assistant.

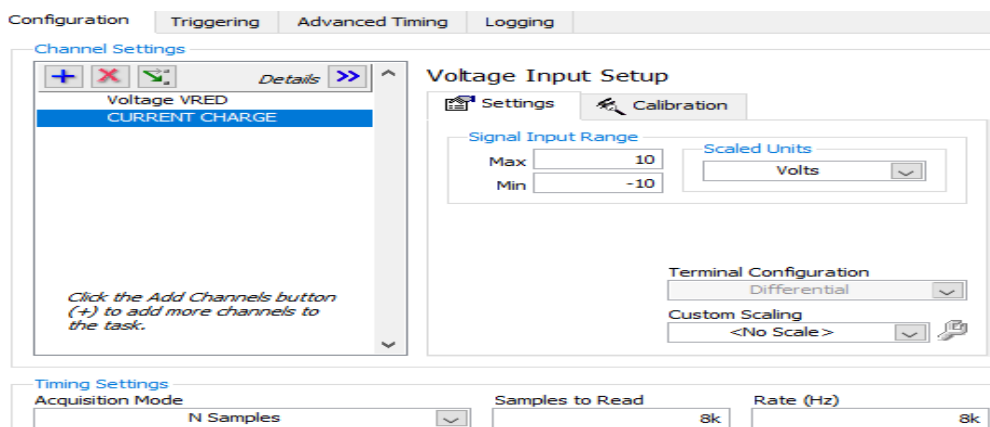


Figura 2.15. Configuración del bloque DAQ Assistant.

En la figura 2.15 se muestra como en Channel Settings dos señales incluidas que son monitorizadas, las cuales decidimos denominar Voltage VRED para la señal de suministro y CURRENT CHARGE para la señal de la carga.

El rango de las señales se encuentra comprendido de -10 V a 10 V.

El modo de adquisición seleccionado será N Samples, con el objetivo que se guarden un número de muestras determinado por Samples to Read a una frecuencia de muestreo determinada en Rate. El número de muestras será 8000 y la frecuencia de muestreo (Rate) 8 kHz, de modo que la duración de la ventana de adquisición, T_w , de las señales será de 1 segundo de acuerdo con:

$$T_w = \frac{\text{Samples to Read}}{\text{Rate}}$$

Configuramos a su vez que la entrada de nuestro reloj sea externa, procedente del PLL, y estará conectada en el pin de la tarjeta denominado PFIO como indica la figura 2.16, el cual será activada con flacos de subida (Active Edge en valor Rising) de la señal. Cada flanco de subida de la señal PLL ocasionará la captura de una muestra durante la adquisición.

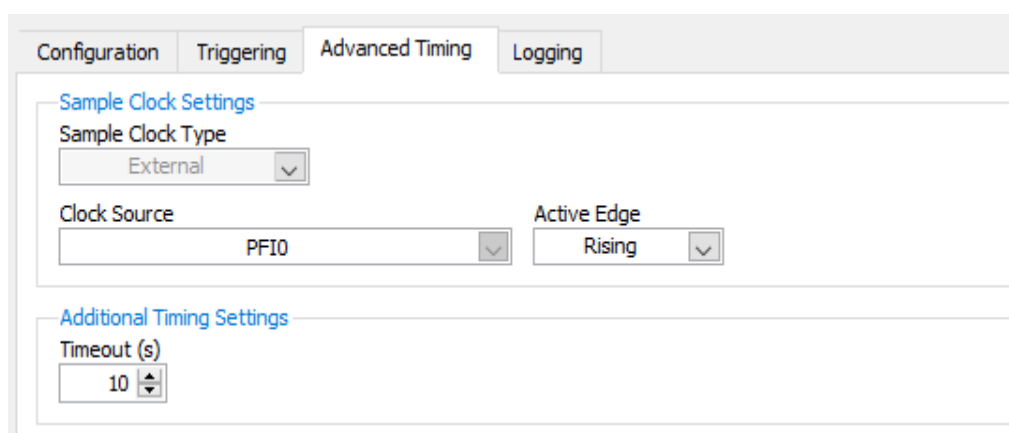


Figura 2.16: Configuración del bloque DAQ assistant.

Para el análisis de las señales de 2 kHz a 9 kHz, se muestreará la señal a 120 kHz por el espacio de tiempo de 1 segundo. En la figura 2.17 se puede observar que la configuración no varía mucho excepto que la frecuencia de muestreo (Rate) tiene valor 120 kHz, el valor de las muestras a leer (Samples to Read) es 120000; de este modo se garantiza que el intervalo de tiempo en el que se capturará las señales es de 1 segundo.

Una vez que terminamos la configuración de los bloques DAQ assistant, dividiremos nuestra VI en 4 pasos.

- Paso 1: se crearán varios bloques para visualizar la forma de onda de las señales de entrada (la señal de tensión en la carga y la señal de tensión de la red). Además se guardaran en un fichero, los valores de las muestras que toman en 1 segundo. Se visualizará los valores rms de ambas señales aunque estos valores no se guardaran en fichero. El fichero utilizado para estas mediciones es independiente al que se utilizará en el resto de la aplicación.

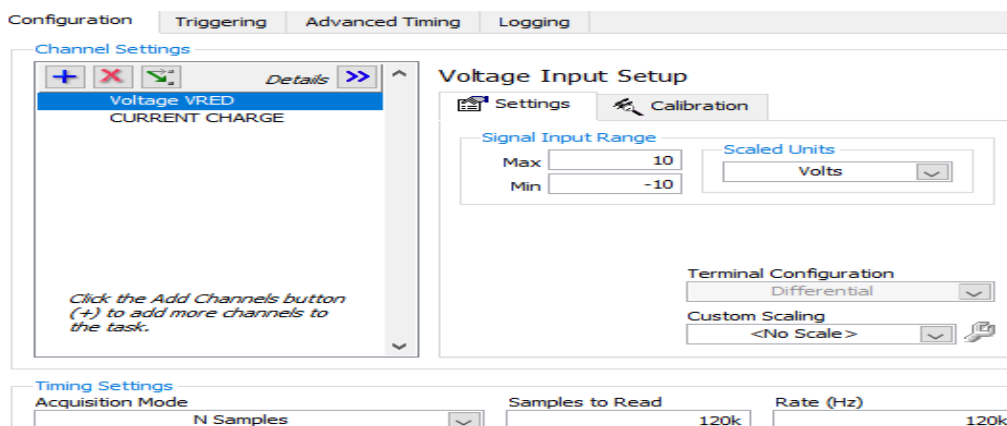


Figura 2.17: Configuración del bloque DAQ assistant.

- Paso 2: analizar 200 ms de las señales a partir de un cruce por cero de la señal de la red, es decir, 10 periodos completos con su inicio en un cruce por cero, según lo indicado por la norma UNE-EN 61000-4-7.
- Paso 3: Se visualizará la forma de onda de la señal de la red, se visualizará a su vez el valor rms que posee. Estos valores, tanto los valores que toma la señal en los 200 ms como su valor rms se guardarán en un fichero. Posteriormente se aplicará la Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT), con esta se obtendrán los valores de amplitud y fase de señal en el dominio de la frecuencia. Estos valores se visualizarán a su vez en dos gráficos muestreada (recordando se utilizan dos frecuencias de muestreo, 8 kHz y 120 kHz), es decir, se mostraran los valores de las líneas espectrales y sus correspondientes valores de fase. Se guardarán los valores de las líneas espectrales y sus valores de fase en el mismo fichero.
- Paso 4: Se aplicará la ley de Ohm para obtener la señal de corriente de la carga pues los valores que se obtuvieron en la adquisición eran de tensión. Posteriormente se visualizar en un gráfico la forma de onda de la señal de carga en el dominio del tiempo, también su valor rms. Se tomarán 10 períodos o lo que es lo mismo 200 ms, y estos valores se guardarán en un fichero. Se aplica la DFT al igual que con la señal de la red y se ejecuta el mismo procedimiento.

Una vez explicado el procedimiento de manera general explicaremos como lo hemos implementado en el diagrama de bloques y el panel frontal de LabVIEW.

Paso 1

En la figura 2.18 podemos observar esta parte en el diagrama de bloques.

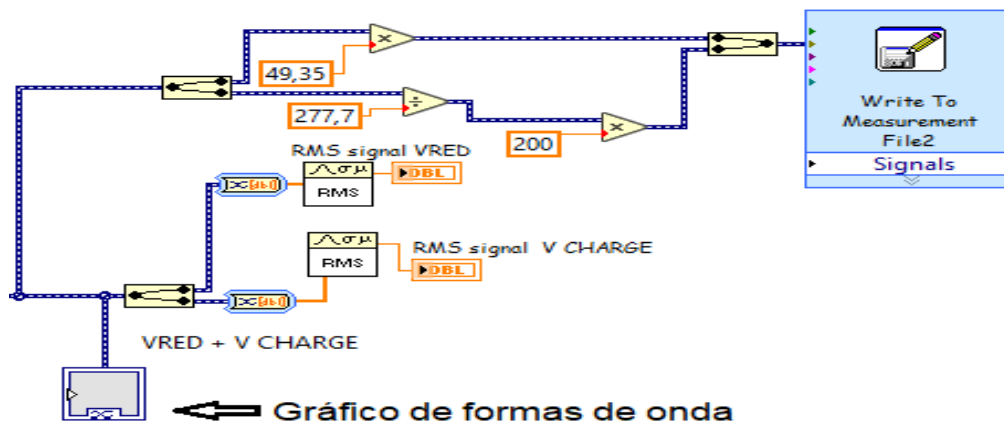


Figura 2.18: Sección de la VI donde se almacena las muestras de la corriente en la carga y la tensión en la red.

Para realizar esta primera parte utilizamos varios bloques imprescindibles, como el gráfico de forma de onda el cual mostrará en el panel frontal al usuario las dos señales en el dominio, a su vez podremos observar los valores rms de estas señales en sendos indicadores numéricos. Las formas de onda se visualizarán en panel frontal de como muestra la figura 2.19.

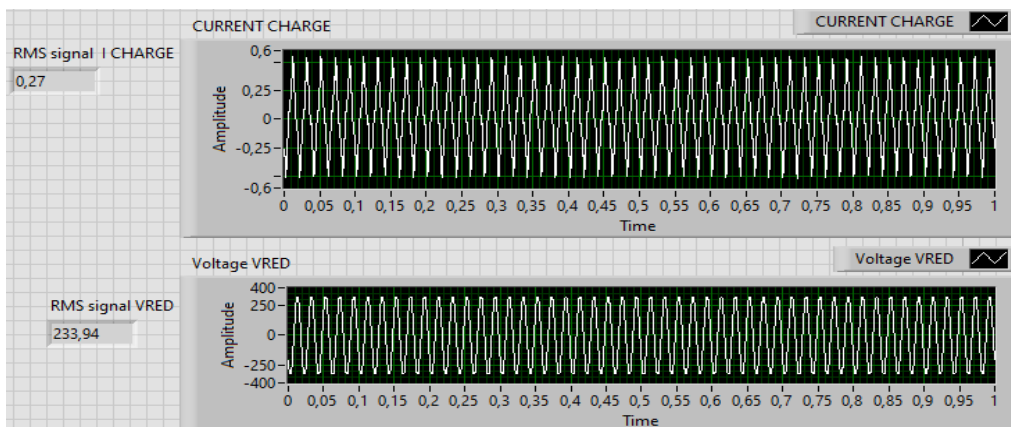


Figura 2.19: Bloque que muestra la forma de onda en el panel frontal para las señales de entrada, en el dominio del tiempo.

Posteriormente dividiremos a través de un bloque Split las señales pues se reciben como una y es necesario obtenerlas de manera independiente. Se multiplicará por el factor numérico 49,35 los valores de la tensión de la red, este no es más que el valor de atenuación que introduce el circuito acondicionador de la señal de tensión. Realizada la multiplicación por este factor tenemos los valores originales de las muestras de la tensión de la red eléctrica.

Se aplicará la ley de OHM para obtener la señal de corriente en el secundario ($I_s = \frac{\text{Tension en la carga (V)}}{277,7 \Omega}$), después obtenemos la corriente en la carga (I_p) multiplicándola por 200, pues recordemos que también a la entrada de la tarjeta de adquisición de datos también se encuentra un circuito acondicionador para obtener el

valor de corriente que circula por la carga el cual introduce este factor de atenuación. La relación entre la corriente en la carga y la que medimos es $I_p = I_s * 200$.

Una vez que tenemos los valores originales de la señal de la tensión en la red eléctrica y la corriente que circula por nuestra carga, se procede a guardar estos valores en un fichero de texto para posteriormente ser analizados, esto lo realizamos a través de bloque *Write to Measurement File*.

Paso 2

Para capturar los 200 ms de las señales posteriormente al cruce por cero de la señal de tensión de la red utilizaremos el bloque denominado *Trigger and Gate*. La función de este es extraer un segmento de una señal, el cual puede ser activado mediante cruces por cero en flanco de subida, flanco de bajada o ambos eventos, en nuestro caso, utilizaremos la primera. Como resultado de que se activa este se entrega un número específico de muestras a su salida.

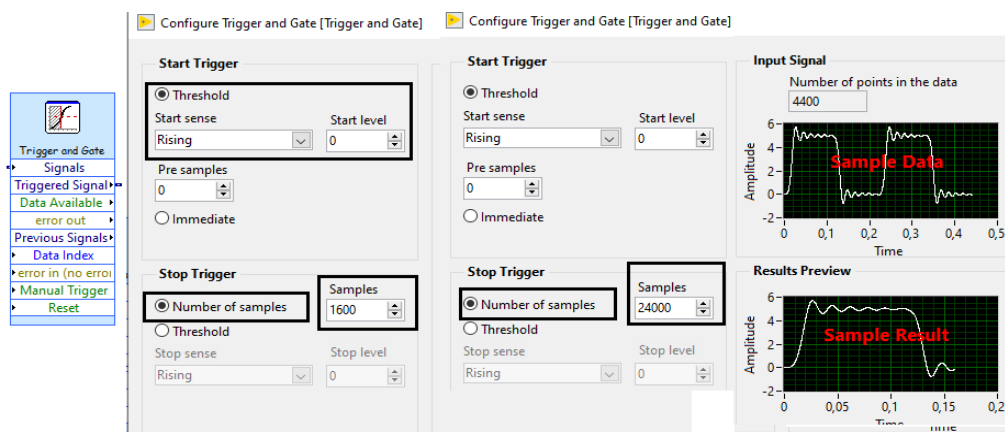


Figura 2.20: Bloque Trigger and Gate y su configuración.

En la figura 2.20, podemos ver el bloque con la configuración para ambas frecuencias de muestreo. Es una configuración para cada frecuencia de muestreo pero con el objetivo de explicar mejor se unió ambas figuras. El *Threshold* (umbral o límite) será activado con flancos de subida a partir de cero, como ya hemos indicado. El *Stop Trigger* que ocasiona el final del disparo se activará una vez que se haya llegado a 1600 muestras o 24000 muestras para las frecuencias de muestreo de 8 kHz y 120 kHz respectivamente, el número de muestreos es el necesario para tener un intervalo de 1 s.

Paso 3

En este paso comprobaremos que realmente estamos tomando los valores de la señal de tensión a su cruce por cero. Luego de multiplicar los valores de la señal por el factor de acondicionamiento, 49.35, se calcula su valor rms, se visualizará en el dominio del tiempo la forma de onda de la señal en el panel frontal. Los valores originales de la señal de tensión de la red en el dominio del tiempo así como su valor rms, se guardaran en un fichero a través del bloque *Write to Measurement File*.

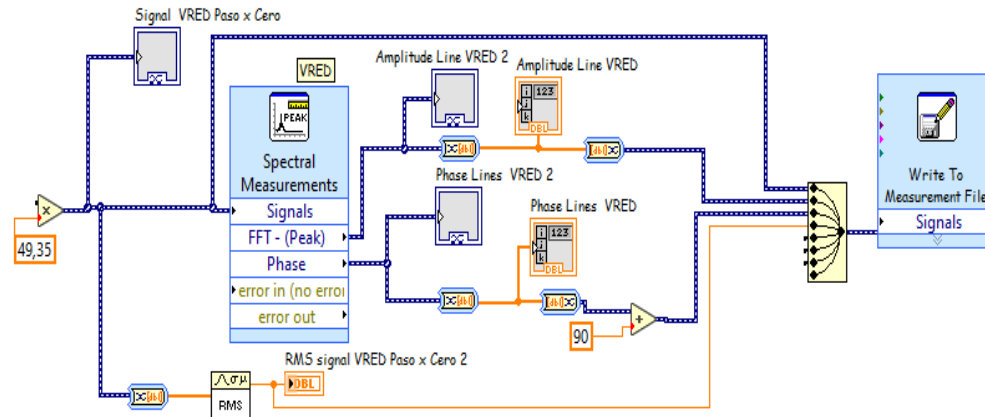


Figura 2.21: Sección de la VI en el diagrama de bloques que muestra el paso 3 en su totalidad.

El bloque más importante de la sección de la figura 2.21 es el *Spectral Measurement* el cual realiza la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), nos proporciona los valores de las amplitudes de las líneas espectrales y los valores de fase de las mismas. En su configuración interna es necesario seleccionar que proporcione los valores de fase en grados en lugar de radianes. Después de realizada la FFT se visualizará las líneas espectrales de frecuencia y los valores de fase a través de gráficos; esto se mostrará en el panel frontal como esta en la figura 2.22.

También se añadió varios arrays de modo que se pueda visualizar el valor de la amplitud de una línea espectral específicamente al igual que su valor de fase. Luego de realizada la FFT y visualizar los valores amplitudes de las líneas espectrales y ángulos de fase, se guardarán los mismo en el mismo fichero del paso 2, para su posterior análisis.

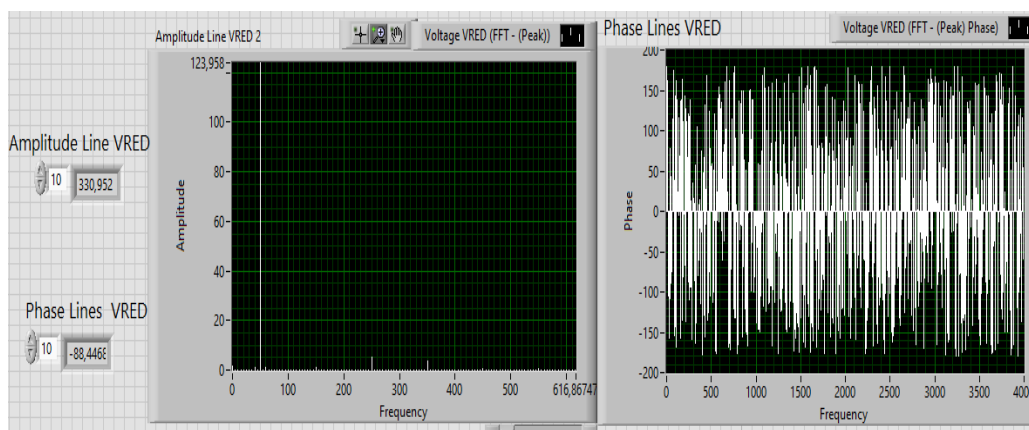


Figura 2.22: Vista del panel frontal para las amplitudes y fases de las líneas espectrales.

Paso 4

En este paso realizaremos lo más importante que nos hemos propuesto en este trabajo, analizar la señal de la carga en el dominio del tiempo y el dominio de la

frecuencia. Nuestro punto de partida será convertir la señal que recibimos de la tarjeta de adquisición de datos de tensión a corriente, aplicando ley de ohm para obtener la I_s mediante $I_s = \frac{\text{Tension en la carga}}{277,7 \Omega}$, y posteriormente hallaremos I_p mediante $I_p = I_s * 200$. Esto se ilustra en la figura 2.23.

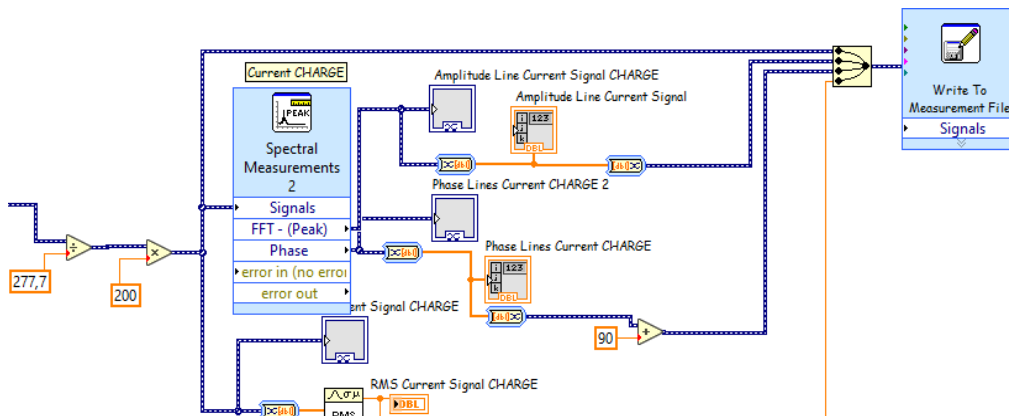


Figura 2.23. Sección del diagrama de bloques que implementa el paso 4.

Con los valores de la señal que circula por la carga obtendremos su valor rms en el dominio del tiempo y lo guardaremos en el mismo fichero del paso 3. Visualizaremos la forma de la señal en el dominio del tiempo y su valor rms en el panel frontal. Como en el paso anterior nos auxiliaremos del bloque *Spectral Measurement* para aplicar la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT). Posteriormente visualizaremos las líneas espectrales y sus valores de fase en sendos gráficos. Los valores de las amplitudes y de las fases de las líneas espectrales serán guardados en el fichero del paso 3.

2.5.3 Cargas Estudiadas

Hasta ahora hemos descrito el diseño e implementación de un banco de pruebas de laboratorio para estudio del espectro armónico de una carga conectada a la red eléctrica.

A continuación vamos a someter a este banco de pruebas a diferentes cargas de uso extremadamente habitual. Para realizar nuestra investigación utilizamos tres cargas disponibles en nuestro laboratorio. Seleccionamos estas en particular por su incidencia actualmente en la vida diaria, con amplio uso tanto en áreas de tipo residencial, industrial y empresarial. Los equipos escogidos fueron:

- cargador de móvil.
- monitor de PC de sobremesa.
- luminaria con 2 lámparas fluorescentes.

2.5.3.1 Cargador de móvil

Sometimos a pruebas el conjunto de un móvil BQ con su cargador. Este tipo de móviles tienen gran presencia en el territorio español y diariamente es conectado a la red para recargar su batería. La potencia nominal del equipo es 3 watts, el mismo posee algunos años de uso. El número de estos dispositivos se ha incrementado exponencialmente en la última década.

Podemos clasificarlo según [2] en correspondencia a la limitación armónica de corriente como Clase D. Esta clasificación es muy importante pues nos permitirá valorar sus emisiones teniendo en cuenta los valores límites para la clase a la que pertenece.



Figura 2.24. Móvil BQ con su cargador utilizado en las mediciones.

2.5.3.2 Monitor de PC de sobremesa

Se utilizó un monitor disponible en laboratorio, la marca del mismo es BenQ y su modelo es el FP95G. El equipo posee una potencia nominal de 40 watts. Es un modelo estándar de una marca de amplio uso no solo en España, sino en Europa y el mundo. Este equipo podemos clasificarlo en Clase D según la norma UNE-EN 61000-3-2.



Figura 2.25. Monitor de sobremesa utilizado en las mediciones.

2.5.3.3 Luminaria

El equipo de iluminación seleccionado posee 2 lámparas fluorescentes no regulables, fue fabricado por la marca española SECOM iluminación S.L. Este equipo podemos clasificarlo en Clase C según la norma UNE-EN 61000-3-2. Además la luminaria utiliza un balasto electrónico Philips, el código del producto es HF- Performer II, como características más significativas el equipo posee un factor de potencia de 0.95, y una potencia nominal de 52 watts.



Figura 2.26. Luminaria utilizada con sus 2 lámparas fluorescentes y el balasto electrónico.

2.5.4 Base de Datos PANDA

PANDA (equiPment hArmoNic DAtabase) es una plataforma global basada en la web, con sede en la Universidad de Dresden en la que participan universidades y laboratorios de Europa y el resto del mundo. En este repositorio se almacena e intercambian mediciones armónicas de una gran variedad de equipos domésticos (equipos monofásicos con corriente nominal por debajo de 16 A). Según las estadísticas del sitio web se han medido alrededor de 762 tipos de equipos, como por ejemplo: muestras de mediciones lámparas led, monitores de escritorio, TV, etc [11].

Como hemos ilustrado en esta memoria de TFM la emisión armónica de equipos domésticos es objeto de muchos estudios de investigación. En gran parte de estos estudios se realizan mediciones de uno o varios equipos electrodomésticos. Lo usual es que para realizar estos estudios se establezca un sistema de medición propio, con características particulares para grupo de investigación. A través de este repositorio se establece una homogeneidad para realizar las mediciones ganando así en fiabilidad de las medidas resultantes. El proyecto persigue varios objetivos clave:

- Aumentar la materia prima de estos estudios de investigación de emisiones armónicas, pues a mayor número de muestras más profundos y eficientes pueden ser los análisis. Además de que como se establecen requisitos para la toma de muestras

la fiabilidad aumenta. Un solo laboratorio no podría generar la totalidad de las muestras necesarias en un momento dado.

- Almacenar muestras de diferentes regiones del mundo, para poder observar posteriormente el desarrollo de las emisiones armónicas de distintos equipos durante un periodo de tiempo más largo.
- Comprobar la eficacia de los estándares que están vigentes y sus correspondientes límites, siendo este su objetivo más importante. Con la información almacenada y los estudios que se realizan busca contribuir al desarrollo de propuestas para actualizar los estándares [11].

Aunque nuestra universidad no es parte del proyecto (en un futuro pudiera serlo), se contactó a participantes del grupo para obtener varias muestras de dos de las cargas que utilizaremos en nuestra investigación. De esto modo se profundizará el estudio de la emisión armónica de los equipos domésticos seleccionados.

2.6 Referencias del capítulo 2

- [1] Asociación Española de Normalización. “UNE-EN 61000-4-7:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM) Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas”. (2004).
- [2] Asociación Española de Normalización. “UNE-EN IEC 61000-3-2:2019 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)”. (2019).
- [3] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf
- [4] https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la%2025-np.pdf
- [5] http://bee.mif.pg.gda.pl/ciasteczkowypotwor/Philips/pe1540_00.pdf
- [6] Sarma, P., Singh, H. K., & Bezboruah, T. “A real-time data acquisition system for monitoring sensor data”. International Journal of Computer Sciences and Engineering, 6(6), 539-542. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i6.539542>. (2018).
- [7] <https://www.ni.com/es-es/innovations/white-papers/11/how-to-choose-the-right-daq-hardware-for-your-measurement-system.html>.
- [8] <https://www.ni.com/pdf/manuals/375296c.pdf>
- [9] <https://www.ni.com/pdf/manuals/375194d.pdf>
- [10] <https://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/usb-6210/pinout/>
- [11] <https://panda.et.tu-dresden.de/cgi-bin/PANDA.cgi>.

3. Medida y análisis

3.1 Descripción de las medidas

En el capítulo II describimos como fue la construcción de nuestro aparato de medida conforme a la norma UNE-EN 61000-4-7 [1]. Con este instrumento podremos medir armónicos e interarmónicos, tanto en redes de suministro como a los equipos que conectáramos a estas.

En este capítulo usaremos dicho aparato para medir las emisiones armónicas de las cargas que hemos seleccionado, pero, primero debemos mapear los contenidos armónicos de nuestra red de suministro. El objetivo de esto es simple, se asume que la red sea estable y no presente distorsión alguna, pero en la práctica como ya hemos explicado en anteriormente no es así; con los valores que se obtengan se sentarán las bases para analizar cómo puede distorsionarse nuestra señal inicial en las cargas.

Para llevar a cabo nuestras mediciones usamos como punto de conexión a la red de distribución de energía eléctrica el laboratorio de Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria.

Una de vez terminada la construcción de manera exitosa de nuestro aparato de medida conforme a la norma UNE-EN 61000-4-7 [1], con el que podremos medir armónicos e interarmónicos tanto en redes de suministro como a los equipos que conectemos a esta, nuestro objetivo inicial era mapear los contenidos de frecuencia de nuestra red de suministro, con ello sentaríamos las bases para analizar cómo serían las emisiones de las cargas que utilizaríamos.

Las mediciones fueron realizadas en la semana del 11 al 15 de noviembre del 2019. Se realizaron en tres horarios:

- 08:30 am
- 03:00 pm
- 08:00 pm

Se realizaron en estos horarios para cubrir los momentos más característicos de la evolución de la actividad a lo largo del día, es decir, inicio del día, a mediados de este cuando hay mucha actividad y por ultimo al finalizar la tarde. Las mediciones tendrían un período de observación de 1s, ya que partimos de la base de que la señal de nuestra red es estable y periódica. Posteriormente tomaremos 200ms de este período, el inicio de nuestro intervalo de tiempo de análisis comenzará con un cruce por cero de la señal. Este segmento lo representaremos en el dominio del tiempo a través de nuestras herramientas de Labview. De nuestra señal de red realizaremos los siguientes análisis:

- Se obtendrá el valor rms de nuestra señal. Se representará la señal en el dominio del tiempo.
- Se aplicará la DFT y se realizará una representación en el dominio frecuencia mediante Labview.
- Se analizará el contenido armónico de la señal, aplicando parte de la normativa vigente: UNE-EN 50160 [2], UNE-EN 61000-3-2 [3] y UNE-EN 61000-4-7.
- Se obtendrán los grupos armónicos, posteriormente para evaluar la distorsión armónica se hallarán los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y la Tasa de distorsión armónica total THD , para ello aplicaremos las ecuaciones 12 y 13 respectivamente, pertenecientes a la UNE-EN 61000-4-7.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_n}{G_1}\right)^2} \quad (12) \quad THD_g = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_{gn}}{G_{g1}}\right)^2} \quad (13)$$

Para encuadrar nuestro análisis del contenido armónico en base a aplicar las normativas debemos tener en cuenta lo siguiente:

La Norma UNE-EN 50160 [2] de forma abreviada nos dice cuáles son las características que debe tener la tensión es suministrada por una red de distribución. Entre las perturbaciones están los llamados fenómenos continuos, los cuales son desviaciones con respecto al valor nominal, entre los cuales encontramos los armónicos. En el acápite 4.2.5, nos indica cuales son los valores para considerar que la red está garantizando un funcionamiento estable:

“En condiciones normales de explotación, durante cada período de una semana, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica individual promediados en 10 min debe ser menor o igual a los valores indicados en la tabla 3.1” [2].

“Además, la Tasa de distorsión armónica total de la tensión suministrada (THD) (comprendidos todos los armónicos hasta el de orden 40) no debe sobrepasar el 8 %.”; se utilizará la ecuación 14 [2].

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (14)$$

La Norma UNE-EN 61000-4-30 “Técnicas de ensayo y de medida Métodos de medida de la calidad de suministro” [4], como indica su nombre establece como asegurarnos de que la red de suministro cumple con los parámetros de calidad descritos en [2]. Sin embargo, cuando nos habla de cómo medir los parámetros de calidad referentes a los armónicos nos remite a la norma UNE-EN 61000-4-7 [1], por lo cual la manera de medir los armónicos para la Red de suministro es a través de un instrumento que cumpla con lo descrito en [1]. Los valores que debe de cumplir son los indicados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro, hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de la tensión fundamental U_1 [2].

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Para demostrar que nuestra red cumple a cabalidad con los requisitos de calidad nos remitimos a la tabla 3.1. Aunque el período de medición debería ser de al menos una semana, si demostramos que las muestras que tomamos cumplen con los parámetros establecidos en la tabla 3.1 estaríamos estableciendo lo mismo. En otras palabras, tomaremos todas las muestras obtenidas, realizaremos el mismo análisis como si fuera de una semana, si se cumple con los datos de la tabla 3.1 demostramos que tiene los requisitos de calidad necesarios.

Las normas UNE-EN 61000-3-2 [3] y UNE-EN 61000-4-7 [1] son más rigurosas sobre los valores de distorsión armónica, que debe de cumplir la tensión de alimentación a la que está sometida el equipo puesto a prueba. En el caso de la UNE-EN 61000-3-2 se describe en el anexo A, capítulo A.2, en la UNE-EN 61000-4-7 se menciona en el epígrafe 5.4, de cualquier modo exponemos a continuación los valores en cuestión:

- “0,9 % para el armónico de orden 3”.
- “0,4 % para el armónico de orden 5”.
- “0,3 % para el armónico de orden 7”.
- “0,2 % para el armónico de orden 9”.
- “0,1 % para los armónicos pares del 2 al 10”.
- “0,1 % para los armónicos del 11 al 40”.

3.2 Análisis de las medidas tomadas de la señal de la Red de suministro

3.2.1 Representación de la señal de la red en el dominio tiempo

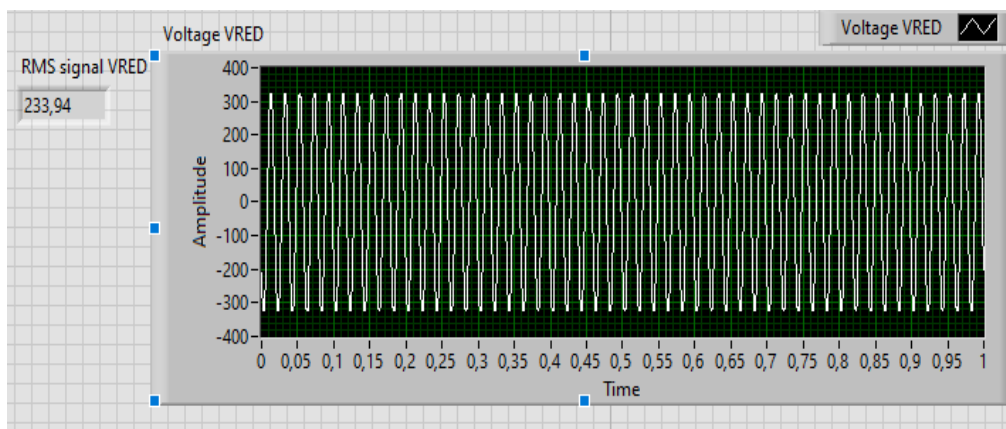


Figura 3.1: Representación de una muestra de la señal de la red en el dominio del tiempo y su valor rms.

Para realizar nuestro análisis diremos que se tomaron 7 medidas de un segundo a las 08:30 am, 7 medidas a las 03:00 pm, y otras 7 medidas a las 08:00 pm. Esto se realizó los días 12 y 13 de noviembre, por lo que en total se obtuvieron 42 tomas de mediciones. Por lo tanto evaluaremos las medidas por secciones.

3.2.2 Representación de la señal de la red en el dominio de la frecuencia

Antes de analizar nuestra señal en el dominio de la frecuencia tomaremos 200ms de la misma, luego de su cruce por cero (ejemplo figura 3.2). Posteriormente aplicaremos la DFT y representaremos la señal en el dominio de la frecuencia, esto se hará con las 42 mediciones realizadas.

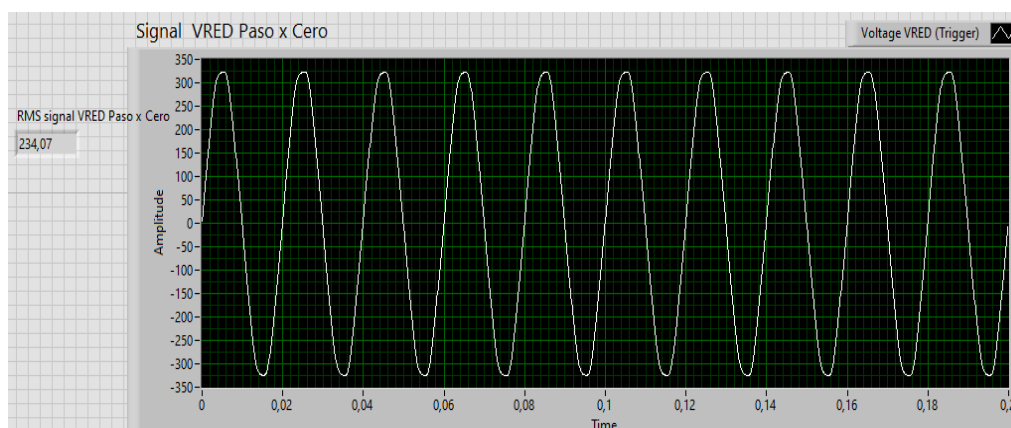


Figura 3.2: Representación de una muestra de señal en el dominio tiempo luego del cruce por cero.

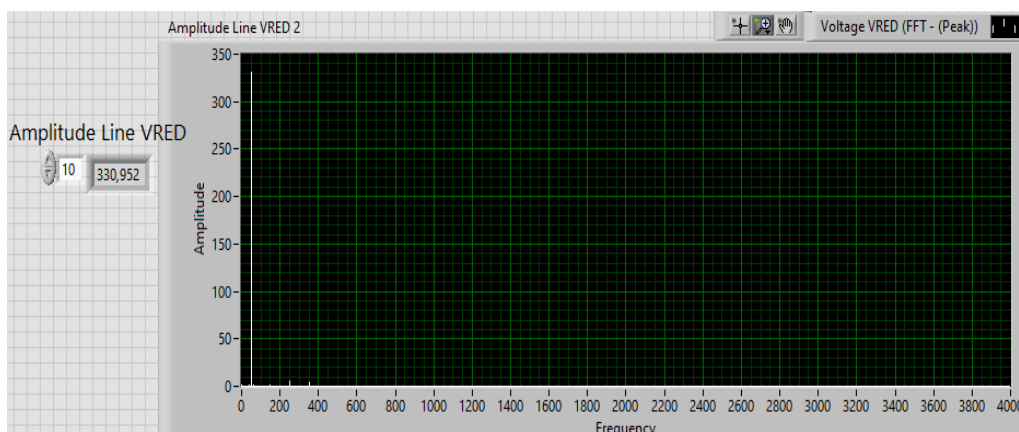


Figura 3.3: Representación de la señal en el dominio frecuencia tras aplicar la DFT.

También se obtuvo los coeficientes de fase para cada una de las líneas espectrales; en la figura 3.4 podemos observar el valor correspondiente para el armónico fundamental. Existen muy pocos estudios sobre el análisis de la fase de las componentes espectrales en la bibliografía estudiada por lo que este es aún un vasto campo por explorar.

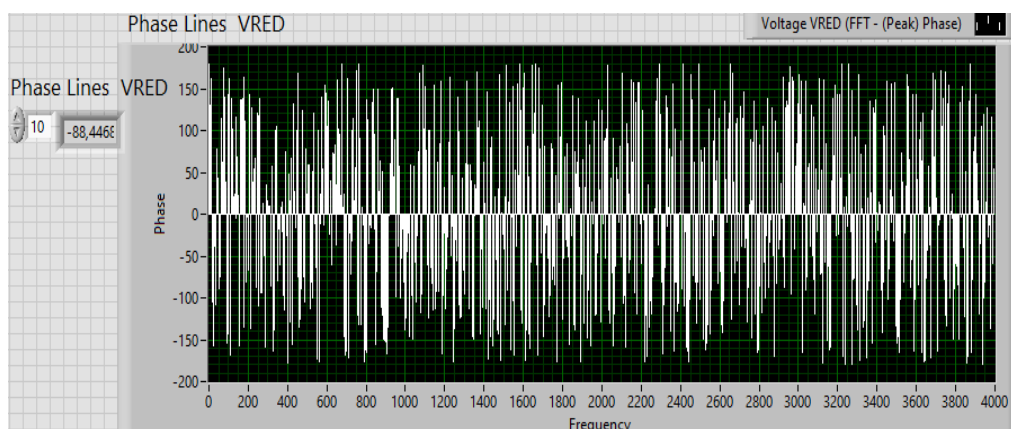


Figura 3.4: Representación de las fases de las componentes de la señal en el dominio de la frecuencia.

3.2.3 Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando parte de la Norma UNE-EN 50160

Para ejecutar este análisis, utilizamos las muestras obtenidas de la señal de la red durante los 3 horarios del día seleccionados. Recordemos se tomaron un total de 21 medidas en cada día, 7 en cada horario. Partimos de la base que consideramos que nuestra red de suministro es estable durante el período de observación como exige el análisis de Fourier. Posteriormente, a través de las mediciones comprobaremos si cumple con los valores requeridos. Una red de suministro con distorsión armónica provocará aún más distorsión en cargas no lineales, por tanto es necesario conocer cuál es la señal base que alimentará a nuestras equipos.

Tabla 3.2: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen del día 12-11-2019.

Valores de la norma UNE-EN 50160		Valores de las amplitudes relativas des mediciones del 12 de noviembre 2019			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Amplitud relativa u_h (08:30 am)	Amplitud relativa u_h (03:00 pm)	Amplitud relativa u_h (08:00 pm)	Amplitud relativa u_h (12-nov)
2	2,0 %	0,019	0,013	0,021	0,017
3	5,0 %	0,303	0,307	0,310	0,307
4	1,0 %	0,013	0,014	0,040	0,022
5	6,0 %	1,781	1,547	1,837	1,721
6	0,5 %	0,012	0,016	0,024	0,017
7	5,0 %	0,869	1,151	0,762	0,928
8	0,5 %	0,008	0,005	0,028	0,014
9	1,5 %	0,272	0,156	0,172	0,199
10	0,5 %	0,015	0,006	0,014	0,012
11	3,5 %	0,355	0,192	0,304	0,283
12	0,5 %	0,009	0,005	0,008	0,008
13	3,0 %	0,229	0,039	0,079	0,115
14	0,5 %	0,013	0,005	0,006	0,008
15	0,5 %	0,048	0,149	0,078	0,092
16	0,5 %	0,007	0,003	0,007	0,006
17	2,0 %	0,040	0,056	0,068	0,055
18	0,5 %	0,004	0,003	0,003	0,003
19	1,5 %	0,018	0,034	0,026	0,026
20	0,5 %	0,004	0,002	0,002	0,003
21	0,5 %	0,017	0,017	0,017	0,017
22	0,5 %	0,002	0,001	0,002	0,002
23	1,5 %	0,009	0,010	0,010	0,010
24	0,5 %	0,002	0,002	0,001	0,002
25	1,5 %	0,008	0,015	0,019	0,014

En la tabla podemos observar que se cumplen los valores máximos establecidos para las mediciones del día 12 de noviembre de 2019, con respecto a la norma UNE-EN 50160. Los valores más cercanos a los límites para los armónicos de orden 5° y 7°. Destacar que cada medida de las 42 analizadas de manera individual cumple los valores establecidos en la UNE-EN 50160.

En la tabla 3.3 repetimos el análisis anterior el día 13 de noviembre de 2019. Presentamos los resultados en la tabla 3.4; se cumple con los límites establecidos en la norma UNE-EN 50160, los valores más cercanos a los límites se repiten en los armónicos de orden 5° y 7° respectivamente; haremos mención especial del armónico 15° que resulta especialmente alto en comparación con su límite propuesto.

Tabla 3.3: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen del día 13 de noviembre de 2019.

Valores de la norma UNE-EN 50160		Valores de las amplitudes relativas des mediciones del 13 de noviembre 2019			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Amplitud relativa u_h (8:30 am)	Amplitud relativa u_h (3:00 pm)	Amplitud relativa u_h (8:00 pm)	Amplitud relativa u_h (13-nov)
2	2,0 %	0,060	0,040	0,032	0,044
3	5,0 %	0,338	0,328	0,345	0,337
4	1,0 %	0,049	0,026	0,043	0,039
5	6,0 %	1,720	1,681	1,779	1,727
6	0,5 %	0,052	0,024	0,033	0,036
7	5,0 %	1,110	1,092	1,047	1,083
8	0,5 %	0,036	0,016	0,016	0,023
9	1,5 %	0,193	0,158	0,135	0,162
10	0,5 %	0,016	0,009	0,008	0,011
11	3,5 %	0,250	0,195	0,162	0,202
12	0,5 %	0,011	0,006	0,006	0,008
13	3,0 %	0,246	0,087	0,073	0,135
14	0,5 %	0,014	0,009	0,009	0,011
15	0,5 %	0,210	0,227	0,151	0,196
16	0,5 %	0,009	0,006	0,008	0,008
17	2,0 %	0,099	0,101	0,029	0,076
18	0,5 %	0,004	0,005	0,005	0,005
19	1,5 %	0,010	0,028	0,017	0,018
20	0,5 %	0,004	0,004	0,003	0,003
21	0,5 %	0,019	0,017	0,016	0,017
22	0,5 %	0,003	0,003	0,003	0,003
23	1,5 %	0,009	0,016	0,015	0,013
24	0,5 %	0,003	0,002	0,002	0,003
25	1,5 %	0,012	0,017	0,020	0,016

Posteriormente calculamos el THD, en este caso lo hicimos por horarios y por día. Cuando analizamos un día entero tomamos la totalidad de las medidas, promediamos y luego calculamos. Aplicamos la ecuación 1 de este capítulo, los resultados están reflejados en la tabla 3.4:

Tabla 3.4: Valores de THD calculados para los días 12 y 13 de noviembre del 2019.

THD UNE- 50160	THD mediciones del 12 de noviembre 2019		
8 %	08:30 am	03:00 pm	08:00 pm
	4,764 %	4,629 %	4,795 %
	THD mediciones del 13 de noviembre 2019		
	4,919 %	4,756%	4,904%

En ambos días los valores que se calculan se encuentran por debajo de los límites de la norma, inclusive para cada uno de los horarios donde se analizó. Para obtener estos

valores se promediaron las muestras obtenidas por horario, 7 en cada uno como se explicó anteriormente, posteriormente se calculó el THD. En este caso no se efectuó el análisis del THD para las medidas de manera individual.

3.2.4 Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2

Sin embargo si aplicamos los requisitos establecidos por la norma UNE-EN 61000-3-2 comprobaremos que los valores superan los límites en algunos armónicos. Destacar que para esta norma el período de observación no queda claramente determinado, solo nos remite a que el instrumento de medición debe de ser acorde a la norma UNE-EN 61000-4-7. Los resultados los presentamos por días, con secciones horarias. En la tabla 3.5 están los resultados del día 12 de noviembre del 2019.

Son superados los límites para cinco armónicos, dígame el 5°, 7°, 9°, 11° y 13°. El caso más crítico es el armónico de orden 5° ya que su valor es superado en más de un punto porcentual. Resaltaremos los armónicos de orden 9° y 13°, los cuales presentan valores límites superados solo ligeramente. Estos valores que superan lo que está establecido se tomarán en cuenta cuando se analicen los resultados de las medidas en las cargas.

Tabla 3.5. Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen día 12 de noviembre de 2019, tomando como referencia la norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 12 de noviembre 2019			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Amplitud relativa u_h (08:30 am)	Amplitud relativa u_h (03:00 pm)	Amplitud relativa u_h (08:00 pm)	Amplitud relativa u_h (12-nov)
2	0,2 %	0,019	0,013	0,021	0,017
3	0,9 %	0,303	0,307	0,310	0,307
4	0,2 %	0,013	0,014	0,040	0,022
5	0,4 %	1,781	1,547	1,837	1,721
6	0,2 %	0,012	0,016	0,024	0,017
7	0,3 %	0,869	1,151	0,762	0,928
8	0,2 %	0,008	0,005	0,028	0,014
9	0,2 %	0,272	0,156	0,172	0,199
10	0,2 %	0,015	0,006	0,014	0,012
11	0,1 %	0,355	0,192	0,304	0,283
12	0,1 %	0,009	0,005	0,008	0,008
13	0,1 %	0,229	0,039	0,079	0,115
14	0,1 %	0,013	0,005	0,006	0,008
15	0,1 %	0,048	0,149	0,078	0,092
16	0,1 %	0,007	0,003	0,007	0,006
17	0,1 %	0,040	0,056	0,068	0,055
18	0,1 %	0,004	0,003	0,003	0,003
19	0,1 %	0,018	0,034	0,026	0,026

20	0,1 %	0,004	0,002	0,002	0,003
21	0,1 %	0,017	0,017	0,017	0,017
22	0,1 %	0,002	0,001	0,002	0,002
23	0,1 %	0,009	0,010	0,010	0,010
24	0,1 %	0,002	0,002	0,001	0,002
25	0,1 %	0,008	0,015	0,019	0,014
26	0,1 %	0,001	0,002	0,001	0,001
27	0,1 %	0,007	0,020	0,011	0,013
28	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
29	0,1 %	0,004	0,005	0,003	0,004
30	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
31	0,1 %	0,003	0,001	0,003	0,002
32	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
33	0,1 %	0,003	0,007	0,006	0,005
34	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
35	0,1 %	0,006	0,007	0,003	0,005
36	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
37	0,1 %	0,005	0,006	0,006	0,006
38	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001
39	0,1 %	0,003	0,004	0,005	0,004
40	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001

El análisis de manera detallada para el día 13 de noviembre de 2019 se presenta en la tabla 3.6. La información es muy similar para ambos días, con varios armónicos que nuevamente superan los límites establecidos. Los más críticos son los armónicos de orden 5°, 7°, 11° y 13°. Los que están cercanos a los límites son los armónicos de orden 9° y 17°.

Tabla 3.6: Valores de las amplitudes de los armónicos en % con respecto al valor del armónico fundamental, resumen día 13 de noviembre de 2019. Tomando como referencia la norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 13 de noviembre 2019			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Amplitud relativa u_h (08:30 am)	Amplitud relativa u_h (03:00 pm)	Amplitud relativa u_h (08:00 pm)	Amplitud relativa u_h (13-nov)
2	0,2 %	0,060	0,040	0,032	0,044
3	0,9 %	0,338	0,328	0,345	0,337
4	0,2 %	0,049	0,026	0,043	0,039
5	0,4 %	1,720	1,681	1,779	1,727
6	0,2 %	0,052	0,024	0,033	0,036
7	0,3 %	1,110	1,092	1,047	1,083
8	0,2 %	0,036	0,016	0,016	0,023
9	0,2 %	0,193	0,158	0,135	0,162
10	0,2 %	0,016	0,009	0,008	0,011
11	0,1 %	0,250	0,195	0,162	0,202
12	0,1 %	0,011	0,006	0,006	0,008

13	0,1 %	0,246	0,087	0,073	0,135
14	0,1 %	0,014	0,009	0,009	0,011
15	0,1 %	0,210	0,227	0,151	0,196
16	0,1 %	0,009	0,006	0,008	0,008
17	0,1 %	0,099	0,101	0,029	0,076
18	0,1 %	0,004	0,005	0,005	0,005
19	0,1 %	0,010	0,028	0,017	0,018
20	0,1 %	0,004	0,004	0,003	0,003
21	0,1 %	0,019	0,017	0,016	0,017
22	0,1 %	0,003	0,003	0,003	0,003
23	0,1 %	0,009	0,016	0,015	0,013
24	0,1 %	0,003	0,002	0,002	0,003
25	0,1 %	0,012	0,017	0,020	0,016
26	0,1 %	0,003	0,003	0,002	0,002
27	0,1 %	0,004	0,007	0,005	0,005
28	0,1 %	0,002	0,001	0,002	0,002
29	0,1 %	0,005	0,007	0,005	0,006
30	0,1 %	0,001	0,002	0,002	0,002
31	0,1 %	0,005	0,008	0,007	0,007
32	0,1 %	0,002	0,001	0,001	0,001
33	0,1 %	0,004	0,006	0,007	0,006
34	0,1 %	0,002	0,001	0,002	0,002
35	0,1 %	0,003	0,005	0,005	0,004
36	0,1 %	0,002	0,001	0,001	0,001
37	0,1 %	0,003	0,004	0,003	0,004
38	0,1 %	0,002	0,001	0,001	0,001
39	0,1 %	0,004	0,003	0,004	0,004
40	0,1 %	0,001	0,001	0,001	0,001

Otro de los índices que utilizamos para evaluar la distorsión armónica fue la Tasa de distorsión total de un grupo armónico $\mathbf{THD_g}$. Para hallar este índice primeramente debemos calcular los grupos armónicos, para ello utilizamos la ecuación número 7 del capítulo 1. Luego agrupamos las medidas por horario, siete por cada uno de ellos y con ellos obtuvimos los grupos armónicos, HG.

Los grupos armónicos contienen información sobre la energía de los armónicos e interarmónicos asociados al correspondiente armónico, por lo que su análisis con respecto a los límites nos dará una medida de la energía que se reparte en los interarmónicos. Debe tenerse en cuenta que aún no existe normativa que limite los valores máximos de los mismos grupos armónicos e interarmónicos.

Si comparamos los valores de los HG con los límites de la UNE-EN 61000-3-2 obtendremos la tabla 3.7 correspondiente al día 13 de noviembre de 2019. En dicha tabla podemos observar con valores cercanos a los límites los de orden 5°, 7° y 15°. Con valores críticos los de orden 9°, 11° y 13°, ya que estos superan los máximos. El valor del $\mathbf{THD_g}$ es de 0,0213 para el 13 de noviembre de 2019.

Tabla 3.7: Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, para el día 13 de noviembre del 2019, se comparan con los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 13 de noviembre de 2019		
Orden h	Amplitud relativa u_h	Harmonic Group (HG) (08:30 am)	Harmonic Group (HG) (03:00 pm)	Harmonic Group (HG) (08:00 pm)
2	0,2 %	0,048	0,070	0,056
3	0,9 %	0,306	0,311	0,312
4	0,2 %	0,032	0,039	0,050
5	0,4 %	1,782	1,548	1,837
6	0,2 %	0,026	0,031	0,032
7	0,3 %	0,870	1,151	0,763
8	0,2 %	0,016	0,015	0,031
9	0,2 %	0,273	0,156	0,172
10	0,2 %	0,020	0,021	0,029
11	0,1 %	0,356	0,193	0,304
12	0,1 %	0,023	0,026	0,032
13	0,1 %	0,230	0,041	0,081
14	0,1 %	0,029	0,023	0,027
15	0,1 %	0,051	0,150	0,080
16	0,1 %	0,016	0,017	0,022
17	0,1 %	0,041	0,058	0,069
18	0,1 %	0,009	0,015	0,015
19	0,1 %	0,020	0,036	0,027
20	0,1 %	0,011	0,011	0,008
21	0,1 %	0,017	0,019	0,017
22	0,1 %	0,005	0,005	0,005
23	0,1 %	0,010	0,012	0,011
24	0,1 %	0,005	0,005	0,004
25	0,1 %	0,009	0,016	0,019
26	0,1 %	0,003	0,004	0,003
27	0,1 %	0,008	0,020	0,012
28	0,1 %	0,003	0,003	0,003
29	0,1 %	0,005	0,006	0,004
30	0,1 %	0,003	0,004	0,003
31	0,1 %	0,005	0,003	0,004
32	0,1 %	0,002	0,003	0,003
33	0,1 %	0,004	0,008	0,006
34	0,1 %	0,002	0,003	0,002
35	0,1 %	0,007	0,008	0,004
36	0,1 %	0,002	0,003	0,002
37	0,1 %	0,006	0,007	0,006
38	0,1 %	0,002	0,003	0,002
39	0,1 %	0,004	0,005	0,005
40	0,1 %	0,002	0,003	0,002

Repetimos dicho análisis para el día 12 de noviembre, los resultados los presentamos en la tabla 3.8. Para este día los valores fueron más significativos, seis HG superan los valores, destacar que resaltamos otros dos que están muy cercanos a los valores tope. Los HG cercanos a los límites son los de orden 4°, 5°, 7° y 9°. Superan los máximos los de orden 5°, 11°, 13°, 15° y 17°, estos son los más críticos. El valor del THD_g nos dio 0,0202 para el 12 de noviembre de 2019.

Tabla 3.8. Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, para el día 12 de noviembre del 2019, se comparan con los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 12 de noviembre 2019		
Orden h	Amplitud relativa u_h	Harmonic Group (HG) (08:30 am)	Harmonic Group (HG) (03:00 pm)	Harmonic Group (HG) (08:00 pm)
2	0,2 %	0,264	0,180	0,237
3	0,9 %	0,392	0,346	0,401
4	0,2 %	0,152	0,088	0,163
5	0,4 %	1,727	1,684	1,784
6	0,2 %	0,101	0,055	0,085
7	0,3 %	1,117	1,094	1,051
8	0,2 %	0,064	0,035	0,036
9	0,2 %	0,198	0,161	0,138
10	0,2 %	0,040	0,025	0,033
11	0,1 %	0,254	0,197	0,165
12	0,1 %	0,046	0,023	0,033
13	0,1 %	0,251	0,090	0,079
14	0,1 %	0,059	0,035	0,038
15	0,1 %	0,216	0,231	0,154
16	0,1 %	0,036	0,033	0,029
17	0,1 %	0,104	0,104	0,036
18	0,1 %	0,023	0,020	0,020
19	0,1 %	0,019	0,032	0,022
20	0,1 %	0,016	0,015	0,013
21	0,1 %	0,023	0,020	0,019
22	0,1 %	0,010	0,010	0,009
23	0,1 %	0,013	0,018	0,018
24	0,1 %	0,008	0,007	0,008
25	0,1 %	0,014	0,019	0,021
26	0,1 %	0,007	0,006	0,006
27	0,1 %	0,008	0,009	0,008
28	0,1 %	0,006	0,005	0,005
29	0,1 %	0,008	0,009	0,007
30	0,1 %	0,005	0,005	0,005
31	0,1 %	0,007	0,010	0,009
32	0,1 %	0,006	0,004	0,005

33	0,1 %	0,007	0,008	0,009
34	0,1 %	0,005	0,005	0,004
35	0,1 %	0,006	0,007	0,007
36	0,1 %	0,005	0,004	0,004
37	0,1 %	0,006	0,006	0,005
38	0,1 %	0,005	0,004	0,004
39	0,1 %	0,007	0,006	0,006
40	0,1 %	0,004	0,004	0,004

3.3 Análisis de las medidas tomadas en las cargas

En el epígrafe anterior realizamos un análisis de la red de suministro que alimenta nuestros equipos, con la caracterización de la misma sentamos las bases del análisis que realizaremos a continuación. En este epígrafe analizaremos las medidas realizadas a las cargas y caracterizaremos a estas. Como ya adelantamos en el capítulo 2, son tres cargas las que estudiaremos:

- Luminaria con 2 Lámparas fluorescentes.
- Monitor de PC de sobremesa.
- Cargador de móvil.

Las medidas fueron tomadas en los mismos horarios que la red (08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm), en los días 12 y 13 de noviembre del 2019. Representaremos en el dominio del tiempo y la frecuencia la señal de corriente de estos equipos.

Nuestro período de observación para estudiar las cargas será de 1 segundo en cada horario y posteriormente se tomarán 200 ms después del cruce por cero de la señal de la red, ya que se midió paralelamente ambas señales. Las medidas serán tomadas inicialmente de manera individual a cada uno de los equipos, posteriormente se realizará combinando 2 cargas, por último, se tomará las medidas de las tres cargas funcionando simultáneamente. En total serán 7 medidas que se realizarán en los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm.

Nuestro análisis lo dividiremos en 2 secciones, la primera de 0 a 2 kHz con las medidas tomadas a 8 kHz y la segunda de 2 kHz a 9 kHz con las mediciones a una frecuencia de muestreo de 120 kHz. Realizaremos los siguientes análisis a la señal de corriente de los equipos de 0 a 2 kHz:

- Se obtendrá el valor rms, se representará la señal en el dominio del tiempo.
- Se aplicará la DFT y se representará en el dominio frecuencia a través de Labview.
- Se analizará el contenido armónico de la señal, aplicando la norma UN 61000-3-2 [3].

- Se representará en diagramas polares los valores de amplitud y fase, para los armónicos de orden impar desde el fundamental hasta el 11º.
- Se obtendrán los grupos armónicos, subgrupos armónicos, posteriormente para evaluar se hallaran los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y la Tasa de distorsión armónica total THD_I .

3.3.1 Análisis de las medidas tomadas en la luminaria. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz

3.3.1.1 Representación de la señal en el dominio del tiempo

Comenzaremos representado la señal de corriente de este equipo en el dominio del tiempo utilizando el instrumento virtual desarrollado con Labview. En la figura 3.5 podemos observar una medida realizada a nuestro equipo el día 13 de noviembre a las 08:30 am. Si comparamos la forma de la señal con la de nuestra Red de suministro nos percatamos de esta ligeramente distorsionada.

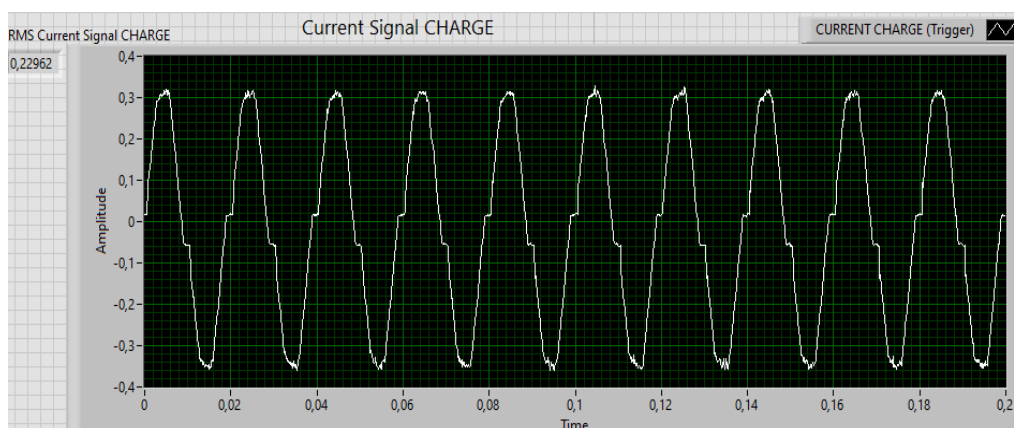


Figura 3.5: Representación de la señal de la corriente que fluye en la luminaria en el dominio del tiempo y su valor rms.

3.3.1.2 Representación de la señal en el dominio de la frecuencia

Para representar nuestra señal en este dominio aplicamos la DFT utilizando la herramienta Labview, obteniendo los coeficientes de amplitud de las líneas armónicas con sus correspondientes fases. Esto se representa en la figura 3.6; para que la imagen mostrara con detalle los valores de los armónicos se limitó la escala. En la gráfica se evidencia claramente como los armónicos de orden 3º, 5º, 7º, 9º y 11º poseen valores significativos en relación al fundamental.

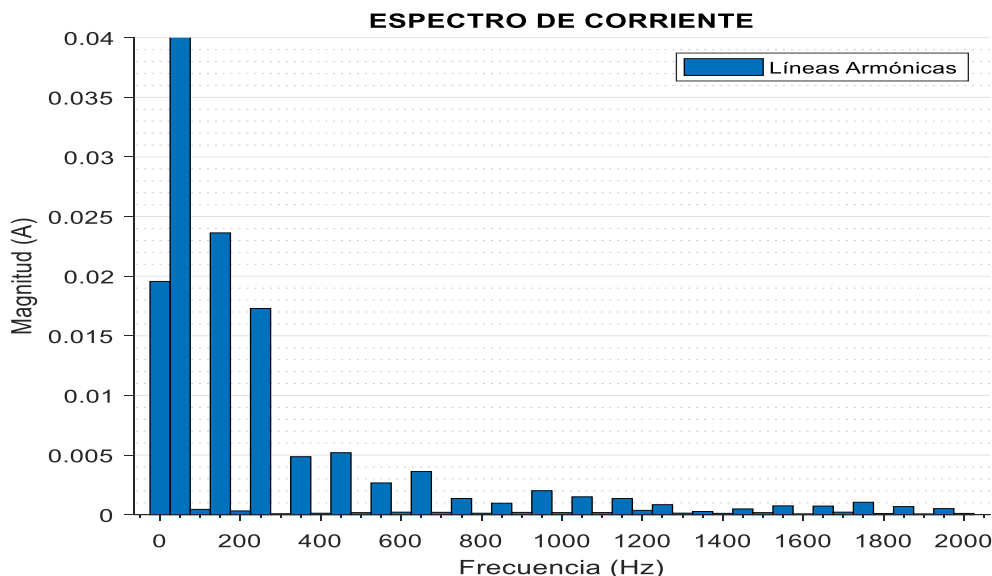


Figura 3.6 Representación de la señal de la corriente que fluye en la luminaria en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.

3.3.1.3 Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2

En esta sección caracterizaremos nuestra carga, para ello nos apoyaremos en la normativa. En el capítulo 2 aclaramos que nuestra luminaria posee 52 watts de potencia y un factor de potencia de 0.95 (λ), por lo cual queda clasificada como equipo de Clase C.

En la tabla 3.9 observamos los valores que se obtienen en las mediciones correspondientes al día 13 de noviembre del 2019, los mismos son comparados con establecido en la Norma UNE-EN 61000-3-2. Los armónicos con valores más críticos son los de orden 3°, 5°, 7°, 11°, 13° y 19°, siendo el más relevante el de orden 5°. Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la señal de la red, con armónicos destacables de orden 5°, 7°, 11°, 15° y 17°, observamos que se repiten en su mayoría; pudiéramos decir que de alguna manera influye, aunque esto no lo podemos comprobar al no realizar esta misma medición con otra señal de alimentación y otras características espectrales.

Algo muy interesante sucede con los valores de las mediciones a las 08:00 pm; son menores en casi todos los armónicos y solo se supera los valores del resto de los horarios en los armónicos de orden 11° y 33°. En ninguno de los armónicos se supera los valores establecidos por la norma.

Tabla 3.9: Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase C de la Norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 13 de noviembre 2019		
Orden h	I_{max} % con respecto al armónico fund.	Amplitud relativa I_h (08:30 am)	Amplitud relativa I_h (03:00 pm)	Amplitud relativa I_h (08:00 pm)
2	2	0,20	0,07	0,01
3	$30 * \lambda = 28,5$	10,43	10,84	10,84
5	10	7,63	7,31	7,31
7	7	2,15	2,28	1,99
9	5	2,29	2,16	2,08
11	3	1,18	1,31	1,39
13	3	1,60	1,17	0,96
15	3	0,60	0,26	0,30
17	3	0,43	0,62	0,40
19	3	0,89	0,78	0,56
21	3	0,66	0,55	0,60
23	3	0,60	0,44	0,53
25	3	0,37	0,29	0,32
27	3	0,12	0,07	0,22
29	3	0,21	0,23	0,11
31	3	0,33	0,17	0,31
33	3	0,32	0,30	0,38
35	3	0,46	0,33	0,31
37	3	0,30	0,28	0,27
39	3	0,23	0,09	0,20

En la tabla 3.10 observamos los valores que se obtienen en las mediciones correspondientes al día 12 de noviembre del 2019. Los armónicos con valores más críticos son los de orden 3°, 5°, 7°, 11°, 13° y 19°, siendo el más relevante el 5° armónico. Para este día la distorsión es menor en algunos armónicos como los de orden 5° y 7°. Nuevamente los valores de las mediciones del horario 08:00 pm son menores en muchos armónicos. En ninguno de los armónicos se superan los valores establecidos por la norma.

Tabla 3.10: Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase C de la Norma UNE-EN 61000-3-2.

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes relativas de las mediciones del 12 de noviembre 2019		
Orden h	I_{max} % con respecto al armónico fund.	Amplitud relativa I_h (08:30 am)	Amplitud relativa I_h (03:00 pm)	Amplitud relativa I_h (08:00 pm)
2	2	0,12	0,10	0,11
3	$30 * \lambda = 28,5$	10,78	10,85	10,66
5	10	6,65	7,04	7,21
7	7	1,92	2,16	2,17
9	5	2,20	2,49	2,17
11	3	1,27	1,40	1,19
13	3	1,49	0,98	0,89
15	3	0,87	0,20	0,56
17	3	0,32	0,32	0,94
19	3	0,71	1,29	0,71
21	3	0,67	0,77	0,64
23	3	0,81	0,60	0,33
25	3	0,53	0,31	0,38
27	3	0,09	0,22	0,42
29	3	0,30	0,53	0,43
31	3	0,51	0,39	0,40
33	3	0,44	0,24	0,54
35	3	0,45	0,40	0,56
37	3	0,76	0,28	0,39
39	3	0,50	0,32	0,06

3.3.1.4 Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal

A continuación realizaremos una representación polar de las amplitudes y fases para los armónicos impares desde el fundamental hasta el de orden 11°. Este tipo de análisis no es muy frecuente en la bibliografía científica estudiada, pero es de gran importancia cuando se estudia la distorsión armónica originada por varias cargas alimentadas por una misma fuente de alimentación. Esto se debe a que el contenido armónico resultante es el fasor suma de las corrientes de cada carga individualmente, existiendo la posibilidad de que disminuya esta distorsión por la diversidad del ángulo de fase en el espectro de armónicos [5].

En la tabla 3.11 presentamos los valores de las amplitudes con sus respectivos valores de fase, en los tres horarios para el día 13 de noviembre del 2019. En la tabla nos percatamos que no existe cambio de fase en los diferentes horarios para estos armónicos, siendo sus valores muy similares a sus valores para amplitud y fase.

Tabla 3.11. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11.

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 13 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,24451	13,76	0,24649	13,75	0,22663	14,62
3	0,02651	201,41	0,02672	202,67	0,02363	203,02
5	0,01787	234,35	0,01802	233,77	0,01729	238,10
7	0,00486	204,87	0,00561	207,13	0,00486	200,11
9	0,00508	254,34	0,00532	251,30	0,00520	260,03
11	0,00340	261,04	0,00322	264,21	0,00267	267,62

En los diagramas polares se representa amplitud y fase en dos coordenadas. La amplitud va desde el centro hacia afuera. La fase se representa en grados desde 0° hasta 360° en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj.

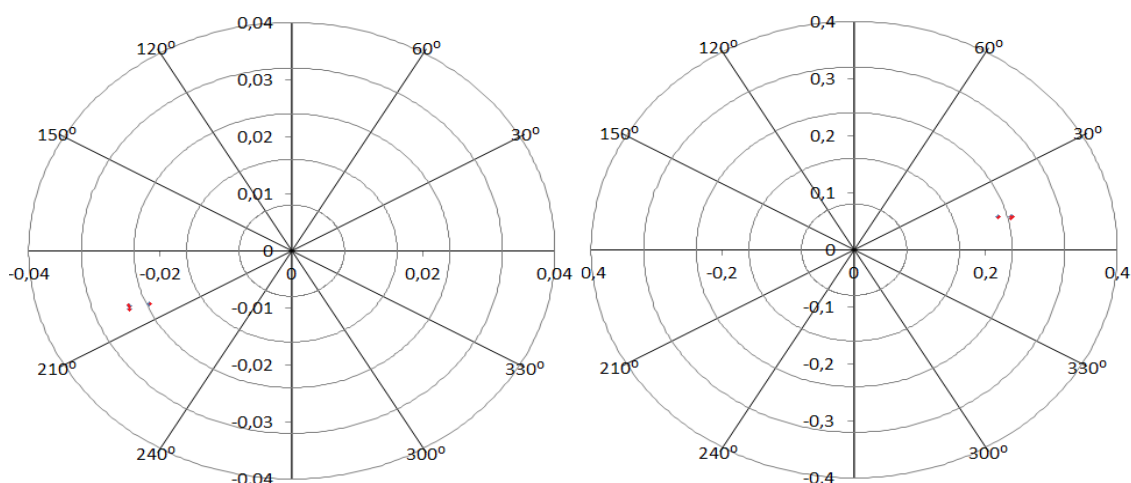


Figura 3.7 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente del día 13 de noviembre del 2019.

El diagrama de la derecha de la figura 3.7 representa el armónico fundamental. Podemos observar que hay dos puntos que coinciden porque sus valores de amplitud y fase son casi iguales (a las 08:30 am y a las 03:00 pm); el tercer punto está un poco más alejado. En la representación para el armónico de orden 3º se repiten las coincidencias, las mediciones de 08:30 am y 03:00 pm tienen valores muy cercanos en amplitud y fase.

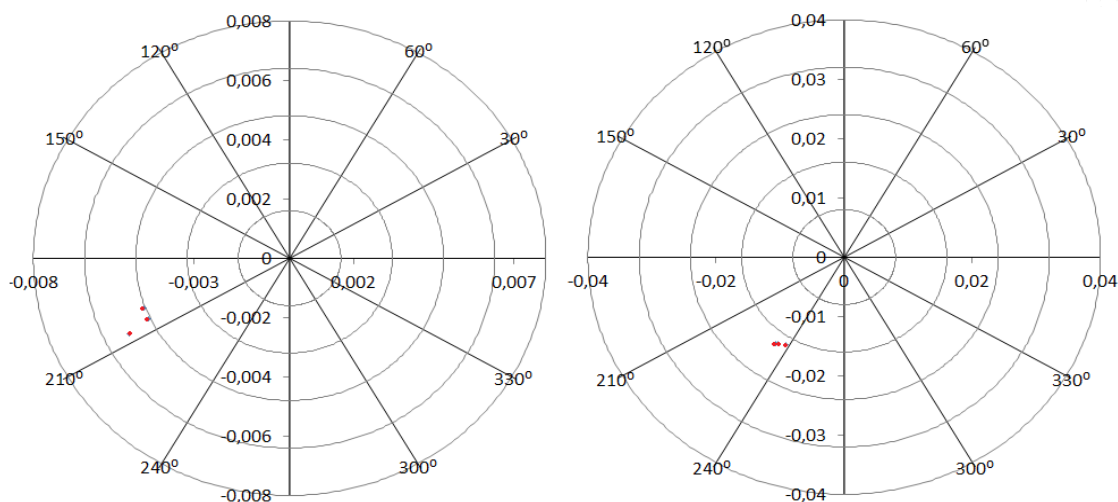


Figura 3.8 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 de noviembre de 2019).

Para el armónico de orden 5º, existen coincidencias para los horarios 08:30 am y 08:00 pm; los dos puntos son prácticamente uno en el diagrama. Para el 7º armónico los valores se encuentran representados de manera muy clara; en este caso no coinciden pero están muy cerca el uno del otro, lo que quiere decir pequeñas variaciones de amplitud y fase.

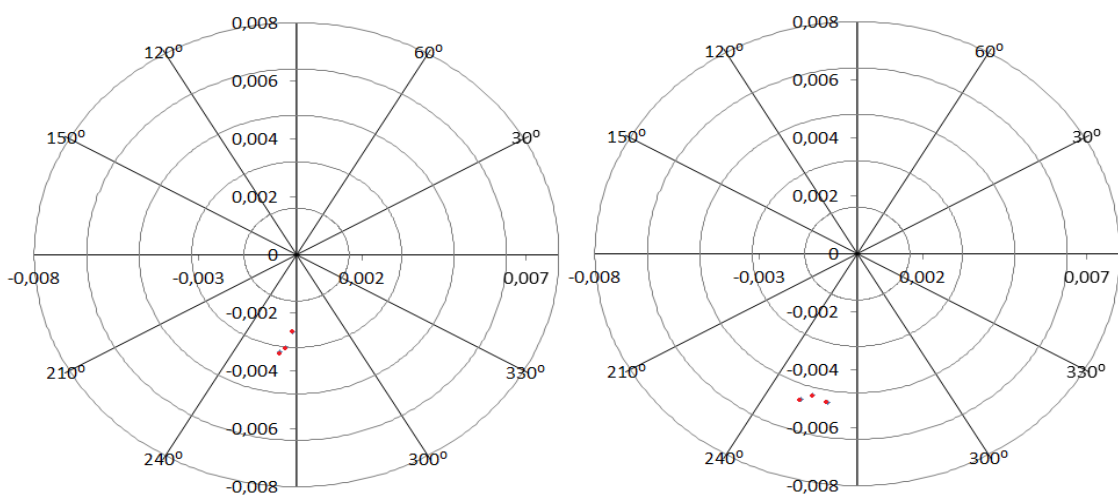


Figura 3.9 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 noviembre de 2019).

En la figura 3.9 de similarmente observamos que tanto para que para ambos armónicos los valores se encuentran muy bien delimitados y cerca el uno del otro, evidenciando poca variación en amplitud y fase para los diferentes horarios donde se tomaron las medidas.

Los valores de nuestras mediciones para el día 12 de noviembre los mostramos en la tabla 3.12, para siendo muy semejantes en los 3 horarios, esto lo veremos representado en los diagramas polares para cada armónico.

Tabla 3.12: Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11º.

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 12 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,24669	13,38269	0,242332	13,74443	0,23851	13,54001
3	0,02647	198,94801	0,02630	202,09400	0,02542	198,34836
5	0,01635	235,41688	0,01707	234,00690	0,01721	234,14085
7	0,00472	217,06607	0,00523	200,73809	0,00519	216,64191
9	0,00539	256,51513	0,00602	254,43893	0,00517	250,26592
11	0,00312	-82,82197	0,00339	246,75378	0,00283	-86,56650

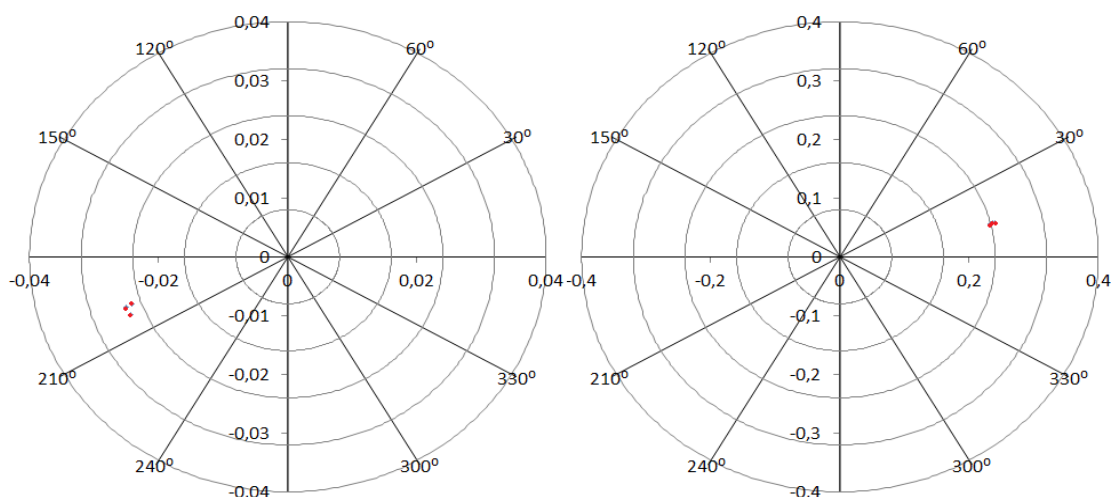


Figura 3.10 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente (día 12 de noviembre de 2019).

Como ya indicamos anteriormente para estos armónicos los valores de amplitud y fase son muy parecidos por lo cual los puntos se encuentran muy cerca uno de otro, es decir presentan pequeñas variaciones respecto de la evolución horaria de la red eléctrica.

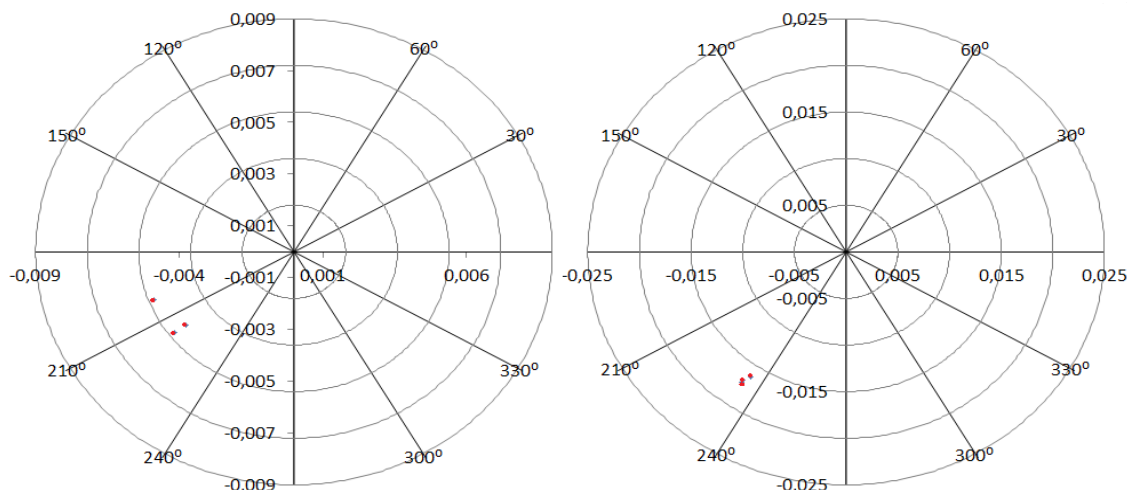


Figura 3.11 Representación de los armónicos de orden 5º y 7º, de derecha a izquierda respectivamente (día 12 de noviembre de 2019).

Para el armónico de orden 5º tenemos una coincidencia en la representación para los horarios de 03:00 pm y 08:00 pm (diagrama de la derecha). Para el diagrama del armónico de orden 7º se observa que los puntos se encuentran muy cerca también.

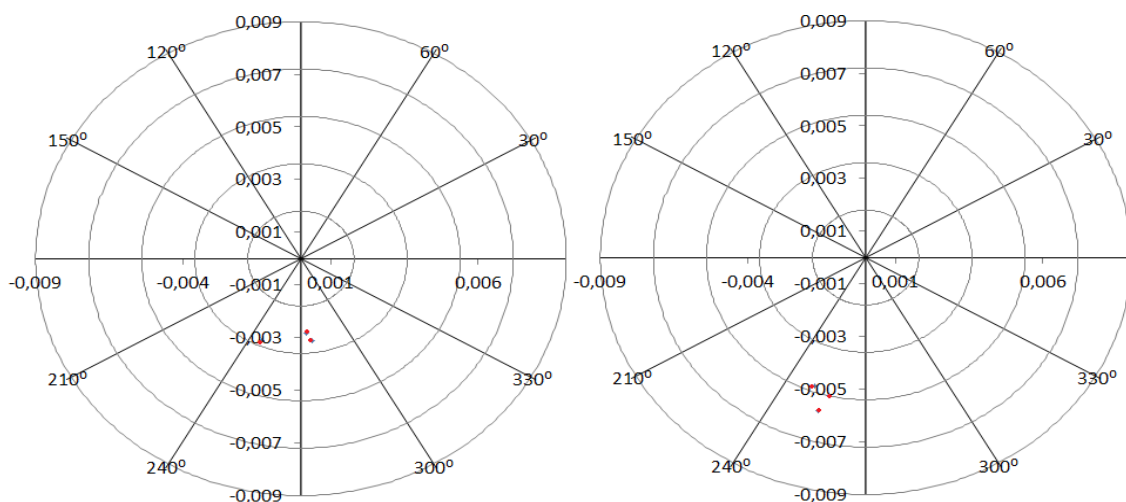


Figura 3.12 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente (día 13 de noviembre de 2019).

En los diagramas de los armónicos de orden 9º y 11º observamos nuevamente puntos muy cercanos debido a valores de amplitud y fase semejantes para los tres horarios.

3.3.1.5 Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THD_g y THD_I

Pasaremos a calcular los grupos armónicos junto con los índices de distorsión total de un grupo armónico THD_g y la distorsión armónica total THD_I . Los valores de los grupos armónicos (HG) en sí, no nos dan una información relevante, pero si

consideramos los límites establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2 o para los armónicos, entonces sí tendremos una referencia con la que compararlos.

En la tabla 3.13, para el día 13 de noviembre de 2019, podemos observar una comparación entre los HG vs los valores de armónicos, la conclusión fundamental que podemos obtener es que existe una gran parte de la energía que se dispersa en los interarmónicos. Para ninguno de los armónicos los valores de las HG coinciden y este análisis lo realizamos con dos cifras significativas por detrás de la coma. Valores de HG significativos son los de orden 2º, 29º, 39º, 17º, entre otros. Cabe destacar que nuestro análisis es solo para los armónicos de orden impar.

No realizamos un análisis para los armónicos de orden par y HG correspondientes, dado que la normativa enfatiza en los armónicos impares. Aún no está normado, según la bibliografía estudiada, cuales son los límites para los pares. Los valores de THD_g para los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm fueron 13.68 %; 13.74 % y 13.69 % respectivamente. Presentamos los valores con 2 cifras significativas para evidenciar los cambios en los diferentes horarios, aunque son casi coincidentes para las 08:30 am y las 08:00 pm.

Tabla 3.13: Valores de los Grupos Armónicos (HG) en % con respecto al HG fundamental, comparación de amplitudes relativas vs HG para el día 13 de noviembre del 2019.

h	Amplitud relativa I_h (08:30 am)	(HG) 08:30 am	Amplitud relativa I_h (03:00 pm)	(HG) 03:00 pm	Amplitud relativa I_h (08:00 pm)	(HG) 08:00 pm
2	0,20	0,42	0,07	0,42	0,01	0,26
3	10,43	10,44	10,84	10,85	10,84	10,85
5	7,63	7,65	7,31	7,32	7,31	7,33
7	2,15	2,17	2,28	2,29	1,99	2,02
9	2,29	2,31	2,16	2,18	2,08	2,11
11	1,18	1,21	1,31	1,36	1,39	1,44
13	1,60	1,63	1,17	1,21	0,96	1,03
15	0,60	0,67	0,26	0,34	0,30	0,42
17	0,43	0,54	0,62	0,65	0,40	0,44
19	0,89	0,95	0,78	0,87	0,56	0,61
21	0,66	0,75	0,55	0,68	0,60	0,69
23	0,60	0,70	0,44	0,55	0,53	0,63
25	0,37	0,45	0,29	0,40	0,32	0,53
27	0,12	0,31	0,07	0,31	0,22	0,34
29	0,21	0,47	0,23	0,47	0,11	0,29
31	0,33	0,43	0,17	0,41	0,31	0,43
33	0,32	0,51	0,30	0,42	0,38	0,59
35	0,46	0,52	0,33	0,40	0,31	0,53
37	0,30	0,40	0,28	0,36	0,27	0,45
39	0,23	0,40	0,09	0,32	0,20	0,36

Los valores de THD_I para los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm fueron 13.56 %; 13.64 % 13.56 % respectivamente. También presentamos la información con dos cifras significativas su parte decimal para evidenciar mejor los cambios en los horarios, aun así coinciden los valores para los horarios 08:30 am y 08:00 pm. Algo importante es que los valores de THD_I son menores que los del THD_g pues estos contienen la energía de los interarmónicos. Esta información es la referente al día 13 de noviembre del 2019.

Presentamos ahora el mismo análisis para el día 12 de noviembre del 2019 mediante la tabla 3.14. Para este día los valores de los HG en algunos casos coinciden con la amplitud relativa, esto lo podemos observar para los armónicos de orden 3º, 9º, en otros, los valores son muy cercanos en el armónico 5º, 7º y el 11º. Aunque esta información no es definitiva pues se presentó con un nivel de precisión de 2 cifras significativas después de la coma.

Los valores de las Tasas de distorsión total de un grupo armónico THD_g para los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm fueron 13,37 %; 13,68 % y 13,53 % respectivamente. Para este día los valores difieren entre sí, aunque nuevamente son muy cercanos.

Tabla 3.14: Valores de los Grupos Armónicos(HG) en % con respecto al HG fundamental, comparación de amplitudes relativas con vs HG para el día 12 de noviembre del 2019.

h	Amplitud relativa I_h (08:30 am)	(HG) 08:30 am	Amplitud relativa I_h (03:00 pm)	(HG) 03:00 pm	Amplitud relativa I_h (08:00 pm)	(HG) 08:00 pm
2	0,12	0,21	0,10	0,24	0,11	0,19
3	10,78	10,78	10,85	10,86	10,66	10,66
5	6,65	6,66	7,04	7,05	7,21	7,22
7	1,92	1,93	2,16	2,17	2,17	2,18
9	2,20	2,20	2,49	2,49	2,17	2,18
11	1,27	1,29	1,40	1,42	1,19	1,20
13	1,49	1,51	0,98	1,01	0,89	0,90
15	0,87	0,90	0,20	0,32	0,56	0,59
17	0,32	0,38	0,32	0,45	0,94	0,64
19	0,71	0,75	1,29	1,32	0,71	0,98
21	0,67	0,70	0,77	0,83	0,64	0,73
23	0,81	0,84	0,60	0,68	0,33	0,69
25	0,53	0,57	0,31	0,39	0,38	0,39
27	0,09	0,23	0,22	0,40	0,42	0,44
29	0,30	0,35	0,53	0,62	0,43	0,48
31	0,51	0,54	0,39	0,45	0,40	0,46
33	0,44	0,48	0,24	0,32	0,54	0,44
35	0,45	0,49	0,40	0,45	0,56	0,58
37	0,76	0,80	0,28	0,38	0,39	0,59
39	0,50	0,53	0,32	0,38	0,06	0,44

Los valores de THD_I para los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm fueron 13,31 %; 13,60 % y 13,46 % respectivamente. Los resultados nos indican que existe parte del contenido espectral que se dispersa en los interarmónicos al igual que en el día anterior a pesar de que es mucho menor.

3.3.2 Análisis de las medidas tomadas en la Luminaria. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz

Luego de consultar la bibliografía se constató que por lo general la emisión de armónicos en la banda de alta frecuencia, 2 kHz a 150 kHz es analizada en dos dominios según se plantea en [6]:

- En el dominio de la frecuencia.
- En el dominio del tiempo.

Sin embargo, algunos autores [6-7] proponen un análisis en el dominio de la frecuencia aplicando la DFT y a su vez en el dominio tiempo-frecuencia aplicando la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT).

LA STFT en el dominio tiempo-frecuencia permite observar los cambios de los contenidos espectrales cada medio ciclo de la señal. Esto supone una ventaja respecto de la DFT que ya que esta última asume explícitamente que la señal es completamente estacionaria.

En el presente trabajo se realizará el análisis en el dominio frecuencia, quedará pendiente para el futuro extender esta investigación en el dominio tiempo-frecuencia aplicando la STFT.

Las mediciones se realizarán utilizando una frecuencia de muestro de 120 kHz, en intervalos de observación 1 s, con inicio en un cruce por cero de la señal de red, en los horarios descritos anteriormente. Posteriormente tomaremos 200 ms de este intervalo.

Se obtendrán los grupos armónicos, para evaluar el contenido armónico de la señal, así como los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico y la Tasa de distorsión armónica total.

El agrupamiento de componentes espectrales en los grupos armónicos, después de aplicar la DFT a la señal, se realiza como se explicó anteriormente en el capítulo 1 a través de la norma UNE-EN 61000 4-7 [1]. En este rango del espectro no es necesaria una alta resolución, por lo que se agrupan componentes espectrales en bandas de 200 Hz. Se establece como frecuencia de la banda la frecuencia central del grupo; de este modo la primera en 2,1 kHz, la siguiente es 2,3 kHz y así sucesivamente hasta llegar el último valor en 8,9 kHz. No utilizaremos PLL para la sincronización debido a la limitación del equipo de que disponíamos en el laboratorio.

Se corresponde G_b (grupos armónicos de alta frecuencia) de cada banda al valor eficaz que se calcula con la ecuación siguiente [1]:

$$G_b = \sqrt{\sum_{f=b-90(Hz)}^{b+100} C_f^2} \quad (15)$$

Tras hallar los valores de los grupos armónicos correspondientes evaluamos el contenido espectral de la señal de corriente en la carga los resultados son los mostrados en la tabla 3.15.

Tabla 3.15: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I correspondientes al día 12 de noviembre del 2019.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_I
08:30 am	0-2 kHz	13,319	12,394
	2-9 kHz (HF)	1,556	0,425
03:00 pm	0-2 kHz	13,184	12,463
	2-9 kHz (HF)	1,430	0,436
08:00 pm	0-2 kHz	13,497	12,663
	2-9 kHz (HF)	1,423	0,372

Inicialmente agrupamos como indica [1] para el rango de frecuencias de 0 a 2 kHz y hallamos los valores de los índices THD_g y THD_I para el rango en cuestión.

Posteriormente agrupamos según lo que indica [1] para el rango de 2 kHz a 9 kHz, obteniendo después de esto los valores de THD_g y THD_I . Con ambos resultados realizamos la comparación de valores, la cual la reflejamos en la tabla 3.15. Los datos más relevantes son los correspondientes al THD_g para todos los horarios. La conclusión que podemos obtener de estos resultados es que existe gran contenido armónico que se reparte en los interarmónicos en alta frecuencia.

Tabla 3.16: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I correspondientes al día 13 de noviembre del 2019.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_I
08:30 am	0-2 kHz	13,682	13,558
	2-9 kHz (HF)	1,476	0,609
03:00 pm	0-2 kHz	13,742	13,639
	2-9 kHz (HF)	1,360	0,451
08:00 pm	0-2 kHz	13,489	12,578
	2-9 kHz (HF)	1,360	0,425

Al igual que en el día anterior, los valores en el horario de las 08:30 am son los más significativos. Sin embargo, en general los valores de distorsión armónica fueron menores en comparación con el día 12 de noviembre.

3.3.3 Análisis de las medidas tomadas en el Monitor de PC de sobremesa. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz

3.3.3.1 Representación de la señal en el dominio del tiempo

Mostramos la representación de la señal de corriente del equipo en el dominio del tiempo con utilizando nuestro instrumento virtual. Con la figura podemos observar una medida realizada a nuestro equipo a las 08:30 am, se evidencia claramente que la señal esta distorsionada con respecto a la señal sinusoidal de la red de suministro.

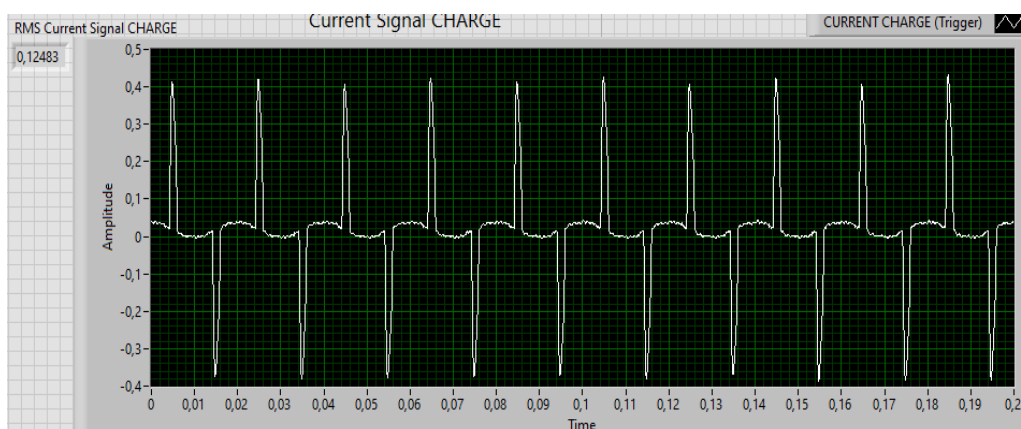


Figura 3.13: Representación de la señal de la corriente que fluye en monitor en el dominio del tiempo y su valor rms.

3.3.3.2 Representación en el dominio frecuencia

Utilizando Labview como herramienta aplicamos la DFT a la señal y obtenemos su representación en el dominio de la frecuencia. Los coeficientes para las líneas espectrales tanto de amplitud como de fase son el resultado de esta representación. Después de aplicar la DFT a la señal de corriente de la carga, su representación en el dominio de la frecuencia será como muestra la figura 3.14. Limitamos la escala del gráfico en el eje de las Y a 0.04, para mantener una uniformidad en el presente texto.

Se puede observar de manera clara la información espectral de la señal, el 5º armónico es el de mayor valor con respecto al fundamental, no descartamos a su vez los de orden 3º, 7º, 9º, entre otros. La figura representa la señal de la carga, en el dominio de la frecuencia de la muestra obtenida el día 12 de nov del 2019, en el horario de las 03:00 pm.

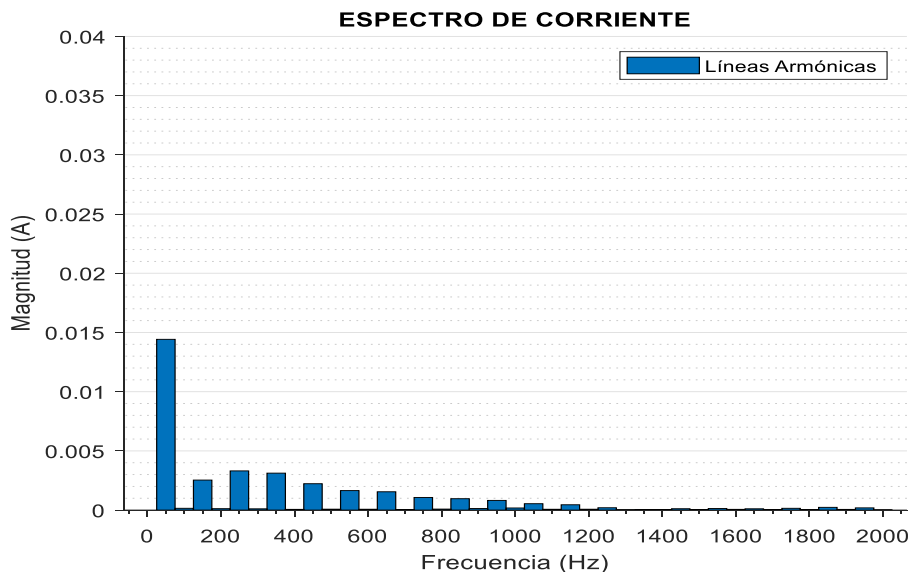


Figura 3.14 Representación de la señal de la corriente que fluye en el monitor en el dominio de frecuencia, tras aplicar la DFT.

3.3.3.3 Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2

En el capítulo 2 al describir las características más importantes de este equipo, declaramos que el mismo poseía una potencia nominal de 40 watts, además que según [3] podíamos clasificarlo en Clase D. Por este motivo utilizaremos los límites designados para esta clasificación como establece [3].

Los límites establecidos los presentamos en el capítulo 1, tabla 1.11, cuando realizamos una breve reseña de la normativa. Pero específicamente utilizaremos la columna 2, para comprobar que establece valores tope en esta medida $\frac{mA}{W}$, es decir, teniendo en cuenta la potencia nominal (40 watts) del equipo serán los máximos de corriente. Luego de realizarlos cálculos los máximos los plasmamos en la tabla 3.17 con los resultados de las mediciones, para el día 12 de noviembre del 2019. En ningún caso se observa que se superan los límites establecidos, destacar las mediciones del horario de las 08:30 am cuyos valores fueron superiores a las demás.

Tabla 3.17. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D [3].

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes absolutas de las mediciones del 12 de noviembre 2019		
Orden h	Corriente armónica permisible (I_{max}) por watt. $[A/W]$	I_h (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)
3	0,136	0,01266	0,00254	0,00247
5	0,076	0,01122	0,00331	0,00336
7	0,04	0,00834	0,00312	0,00263
9	0,02	0,00682	0,00223	0,00215
11	0,014	0,00461	0,00165	0,00159
13	0,296	0,00408	0,00155	0,00147
15	0,257	0,00372	0,00107	0,00115
17	0,227	0,00382	0,00096	0,00110
19	0,203	0,00405	0,00082	0,00099
21	0,183	0,00378	0,00054	0,00045
23	0,167	0,00331	0,00045	0,00050
25	0,154	0,00237	0,00020	0,00020
27	0,143	0,00180	0,00004	0,00014
29	0,133	0,00142	0,00012	0,00001
31	0,124	0,00138	0,00014	0,00014
33	0,167	0,00133	0,00011	0,00012
35	0,11	0,00118	0,00015	0,00012
37	0,0104	0,00096	0,00023	0,00017
39	0,0099	0,00066	0,00019	0,00019

En la siguiente tabla observamos los valores de las mediciones para el día 13 de noviembre. En este caso también observamos un patrón similar al día anterior, se cumple con los valores máximos establecidos, a su vez para el armónico de orden 11º tanto en el horario de las 03:00 pm como de las 08:00 pm sus valores están cercanos al tope. No se nota influencia de los valores de distorsión de la red, analizados en la sección 3.3.1.3.

Tabla 3.18. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase de D [3].

Valores de la norma UN 61000-3-2		Valores de las amplitudes absolutas de las mediciones del 13 de noviembre 2019		
Orden h	Corriente armónica permisible (I_{max}) por watt. $[A/W]$	I_h (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)
3	0,136	0,00252	0,03228	0,03196
5	0,076	0,00351	0,02928	0,02882
7	0,04	0,00312	0,02442	0,02376
9	0,02	0,00220	0,01869	0,01784
11	0,014	0,00173	0,01251	0,01168
13	0,296	0,00182	0,00742	0,00664
15	0,257	0,00109	0,00304	0,00269
17	0,227	0,00106	0,00264	0,00284
19	0,203	0,00078	0,00379	0,00396
21	0,183	0,00063	0,00454	0,00467
23	0,167	0,00048	0,00428	0,00421
25	0,154	0,00022	0,00350	0,00330
27	0,143	0,00013	0,00233	0,00194
29	0,133	0,00007	0,00104	0,00074
31	0,124	0,00006	0,00079	0,00088
33	0,167	0,00012	0,00144	0,00151
35	0,11	0,00016	0,00181	0,00175
37	0,0104	0,00013	0,00180	0,00160
39	0,0099	0,00010	0,00141	0,00118

3.3.3.4 Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal

Al igual que para la luminaria realizaremos una representación polar de las amplitudes y fases para los armónicos impares desde el fundamental hasta el de orden 11º.

En la tabla número 3.19 presentamos los valores de las amplitudes con sus respectivos valores de fase, en los tres horarios para el día 13 de noviembre del 2019. En la tabla nos percatamos que no existe cambio de fase en los diferentes horarios para estos armónicos, siendo sus valores muy similares a sus valores para amplitud y fase.

Tabla 3.19 Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11º.

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 12 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,02081	47,69954	0,01442	77,88226	0,01437	77,66098
3	0,01266	197,04664	0,00254	169,8123	0,00247	172,09008
5	0,01122	22,96011	0,00331	-33,82550	0,00336	-34,38442
7	0,00834	219,37392	0,00312	133,7140	0,00263	139,81239
9	0,00682	60,36773	0,00223	-33,76908	0,00215	-28,73786
11	0,00461	-82,36592	0,00165	127,0961	0,00159	127,02428

El diagrama de la derecha de la figura 3.15 representa el armónico fundamental. Podemos observar que hay dos puntos que coinciden porque sus valores de amplitud y fase son casi iguales (a las 08:00 pm y a las 03:00 pm); el tercer punto está un poco más alejado. En la representación para el armónico de orden 3º se repiten las coincidencias, las mediciones de 08:00 pm y 03:00 pm tienen valores muy cercanos en amplitud y fase.

Se repite la misma situación para las figuras 3.16 y 3.17 respectivamente, los valores de las mediciones de las 03:00 pm y 08:00 pm tienen valores muy similares por lo cuándo se representan coinciden en el plano.

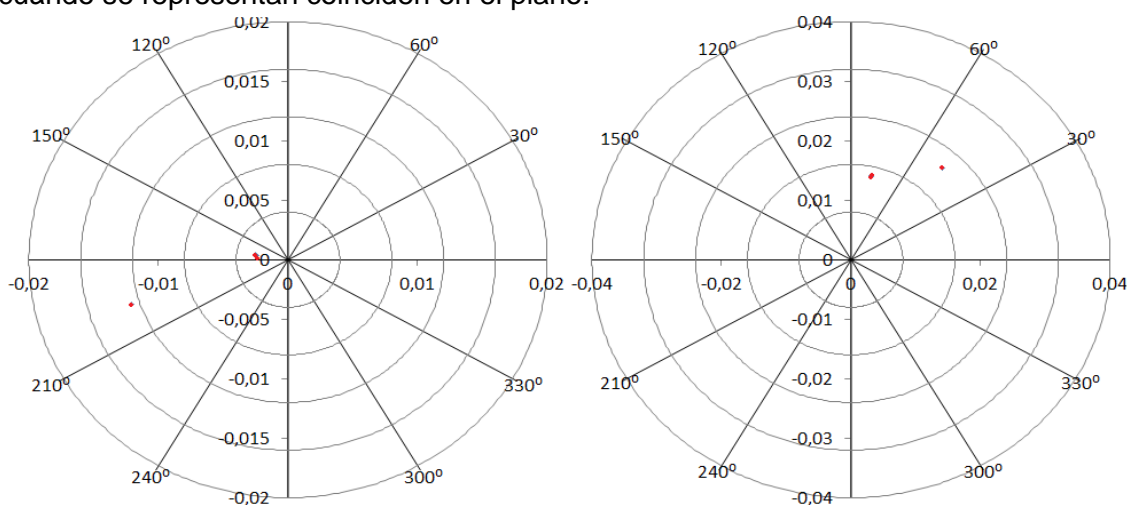


Figura 3.15 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre del 2019.

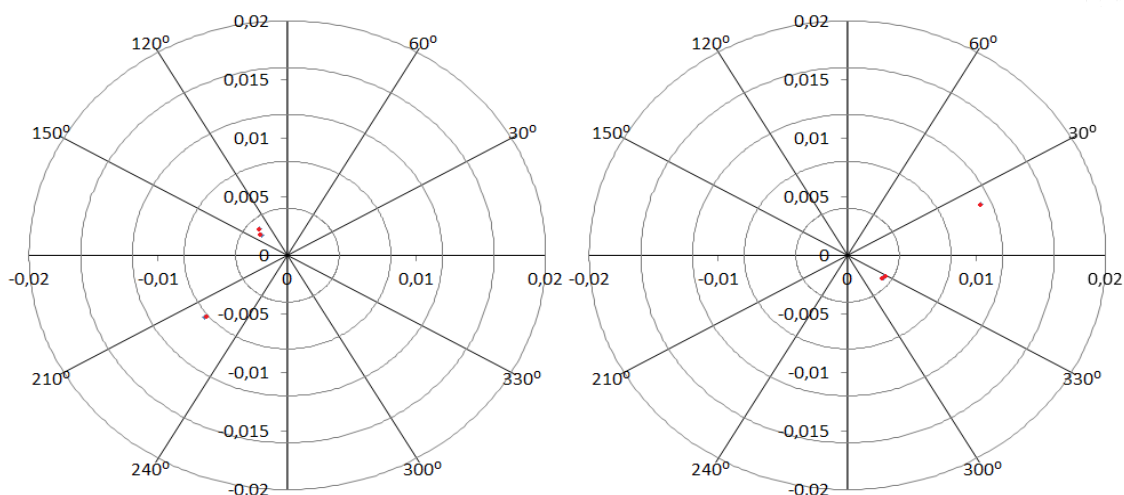


Figura 3.16 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre de 2019.

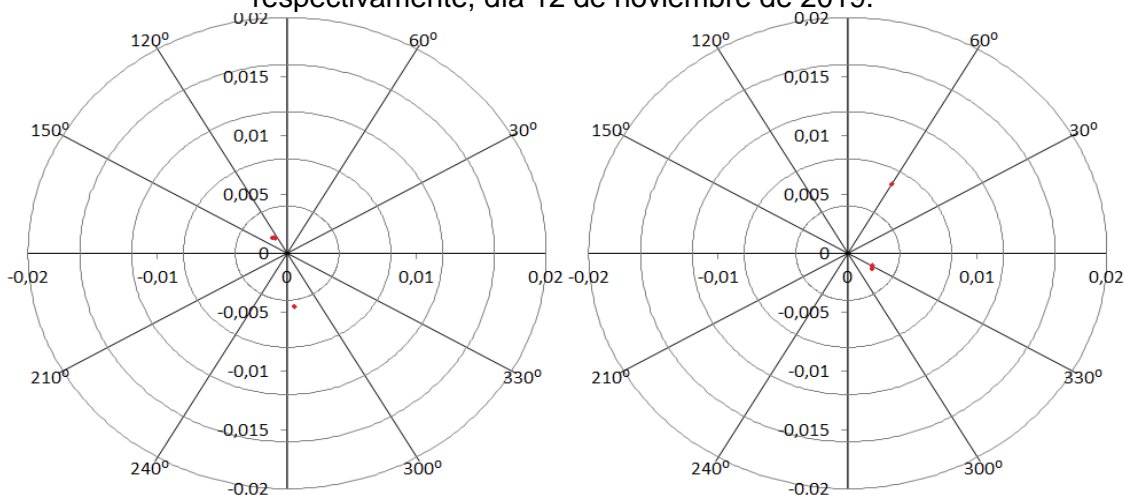


Figura 3.17 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 noviembre de 2019.

Los valores de nuestras mediciones para el día 13 de noviembre los mostramos en la tabla 3.20, para siendo muy semejantes en los horarios de la tarde, esto lo veremos representado en los diagramas polares para cada armónico.

Tabla 3.20. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11º.

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 13 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,01409	76,20668	0,03714	21,70037	0,03688	21,55523
3	0,00252	157,29738	0,03228	178,5915	0,03196	177,11934
5	0,00351	-47,15395	0,02928	-4,35576	0,02882	-6,75129
7	0,00312	112,18491	0,02442	175,2375	0,02376	171,89498
9	0,00220	-69,81744	0,01869	-1,86108	0,01784	-6,09003
11	0,00173	77,39541	0,01251	179,8654	0,01168	175,28232

Tanto en la figura 3.18 como en la 3.19 puede apreciarse lo que planteábamos anteriormente, los horarios de 03:00 pm y 08:00 pm poseen valores muy cercanos, estos puntos no distan mucho entre sí en los diagramas.

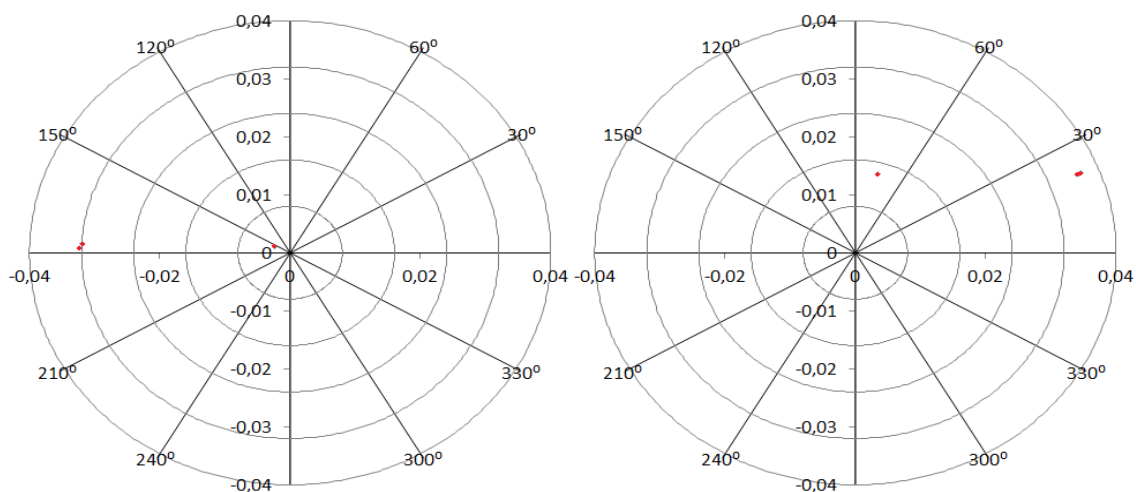


Figura 3.18 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre del 2019.

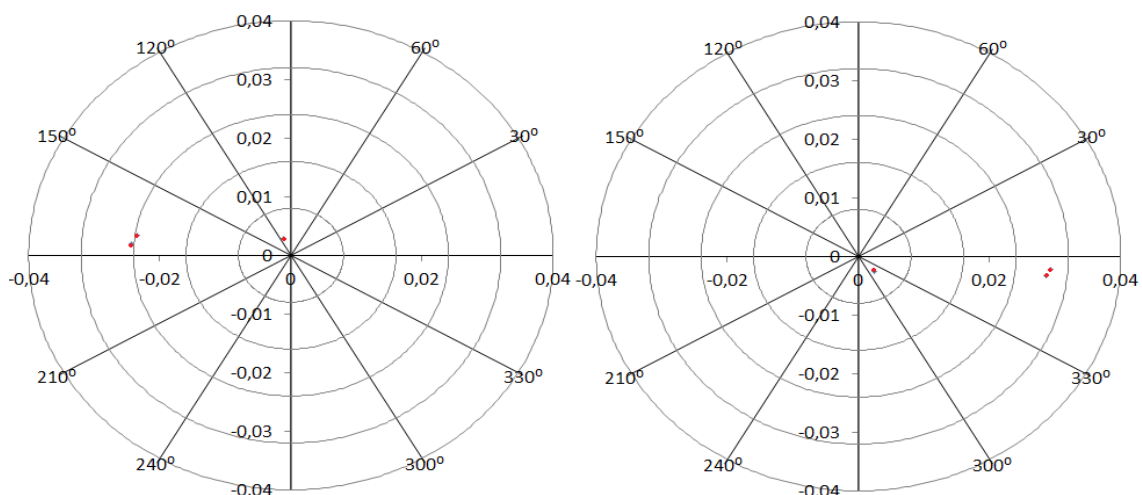


Figura 3.19 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre de 2019.

En la figura 3.20 se observa el mismo patrón descrito anteriormente en las figuras anteriores con las mediciones realizadas este mismo día.

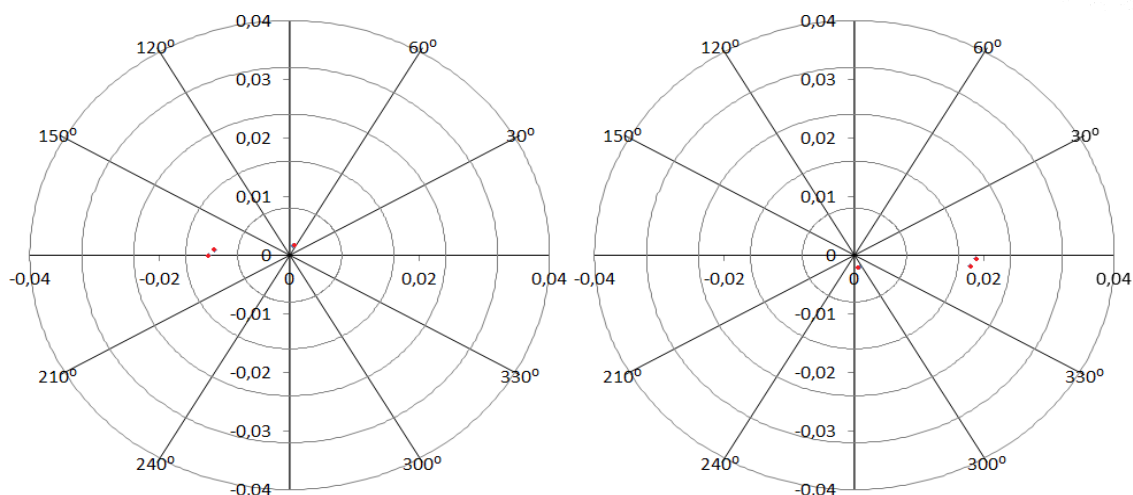


Figura 3.20 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 noviembre de 2019.

3.3.3.5 Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THD_g y THD_I

Anteriormente precisamos que este equipo según [3] pertenece a la clase D, por este motivo el análisis de comparar los valores de las amplitudes relativas vs a los HG no se realizará. En este caso los límites de las amplitudes relativas no se regulan, por lo que nuestro enfoque será diferente.

Tabla 3.21: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , para ambos días de las mediciones en %.

Día	Horario	THD_g	THD_I
12-nov	08:30 am	148,70	110,41
	03:00 pm	45,62	44,28
	08:00 pm	44,19	43,20
13-nov	08:30 am	52,83	48,40
	03:00 pm	151,81	151,29
	08:00 pm	150,02	148,77

En los resultados presentados podemos obtener la misma conclusión que cuando analizamos la luminaria, el valor de THD_g según los resultados es mayor que el THD_I . Esto se debe a que el primero contiene toda la energía que se reparte en los armónicos e interarmónicos, el segundo se refiere a la energía que poseen los armónicos, dándonos más evidencia de la distorsión presente en los interarmónicos.

Muy importante señalar que 3 de las mediciones poseen valores de THD_g y THD_I superiores a los que fueron obtenidos de la luminaria. En la figura 3.13 pudimos observar claramente que la forma de onda esta distorsionada si se compara con la señal original de la Red. Sin embargo los otros 3 valores obtenidos de THD_g y THD_I ,

son menores tanto a los calculados en la luminaria con a los presentados en la tabla 3.21. Según los autores de [5] el THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100 %, por lo que no es de sorprenderse de los resultados obtenidos. Revisando la literatura comprobamos que en el artículo [8], en el cual se realizaron mediciones a varias lámparas se obtuvieron resultados THD_I con valores superiores de 100 puntos porcentuales, específicamente 121 %.

Tal vez será necesario realizar continuar esta prueba durante más días en los mismos horarios para tener una conclusión más sólida al respecto, al menos con este equipo en específico.

3.3.4 Análisis de las medidas tomadas en el monitor PC de sobremesa. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz

En el apartado 3.3.2 se explicó cómo se realizaría el procedimiento para el análisis en este rango de frecuencia, con esta carga se repetirá el mismo. Los valores de los índice THD_g y THD_I son presentados en la tabla.

Tabla 3.22: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_I
08:30 am	0-2 kHz	148,372	134,423
	2-9 kHz (HF)	4,0227	0,766
03:00 pm	0-2 kHz	41,647	34,890
	2-9 kHz (HF)	1,7323	0,498
08:00 pm	0-2 kHz	43,137	31,721
	2-9 kHz (HF)	1,874	0,609

Los valores presentados para el rango de 0-2 kHz (Low frequency o LF) son los calculados en el apartado anterior en valores de %. Al comparar los valores del rango de 2-9 kHz (HF) con los LF existe una diferencia sustancial, a diferencia de los resultados de la luminaria.

Tanto en la tabla 3.22 como en la tabla 3.23 los valores obtenidos arrojan que la mayor distorsión está presente en la banda de frecuencia de 0-2 kHz, aunque no deja de estar presente en alta frecuencia. El índice THD_g nos muestra que en HF la energía se reparte aún más en los interarmónicos.

Los resultados obtenidos no son concluyentes, será necesario extender esta prueba a este equipo durante más días, comparar resultados y verificar si el comportamiento persiste.

Tabla 3.23: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa Distorsión armónica total THD_1 , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_1
08:30 am	0-2 kHz	57,223	39,286
	2-9 kHz (HF)	2,147	0,697
03:00 pm	0-2 kHz	142,109	132,732
	2-9 kHz (HF)	3,806	0,993
08:00 pm	0-2 kHz	145,927	123,467
	2-9 kHz (HF)	4,163	1,029

3.3.5 Análisis de las medidas tomadas en el cargador de móvil. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz

3.3.5.1 Representación de la señal en el dominio del tiempo

Comenzamos como en el resto de las cargas con la representación en el tiempo. Seleccionamos una muestra tomada a las 08:30 am, del día 12 de nov. En la figura se evidencia perfectamente que existe una distorsión en la señal, aunque queda por comprobar si está dentro de los límites correspondientes.

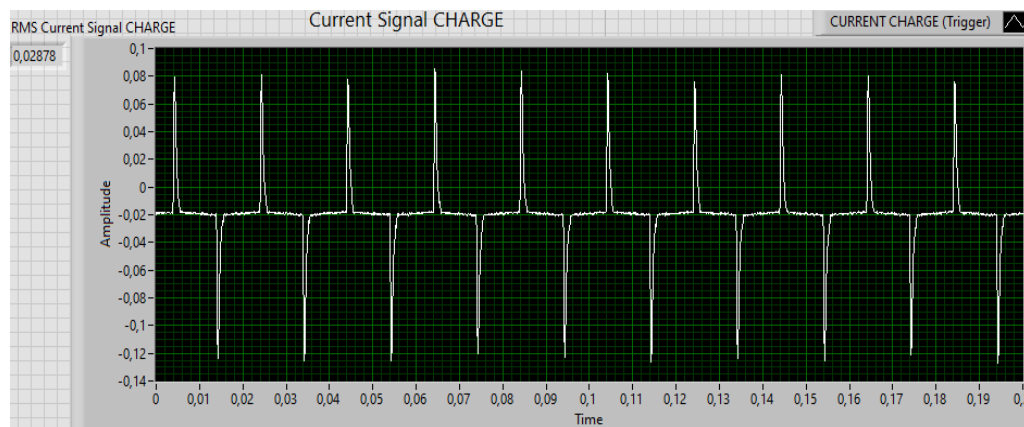


Figura 3.21: Representación de la señal de la corriente que fluye en móvil en el dominio del tiempo y su valor rms.

3.3.5.2 Representación en el dominio de la frecuencia aplicando la DFT

Luego de aplicar la DFT a la señal de la carga con la herramienta Labview obtenemos la representación de la misma en el dominio de la frecuencia.

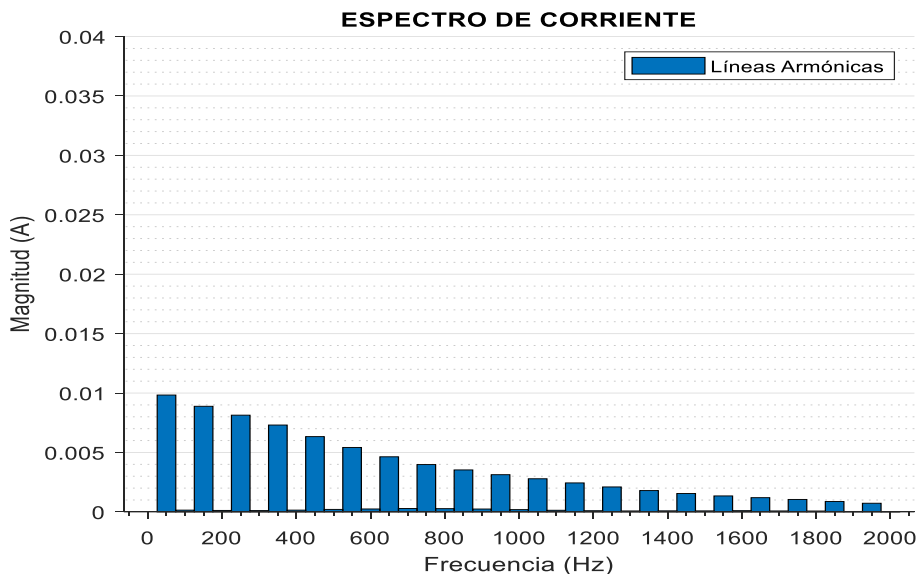


Figura 3.22 Representación de la señal de la corriente en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.

Esta imagen es la más representativa hasta ahora de las analizadas, nos muestra claramente el contenido armónico de la señal, se puede ver los armónicos de diferente orden de manera descendente. Nuevamente limitamos la escala del gráfico en el eje de las **Y** a 0.04, para mantener la uniformidad del texto. La figura representa la señal de la carga, en el dominio de la frecuencia de la muestra obtenida el día 12 de nov del 2019, en el horario de las 08:30 am.

3.3.5.3 Análisis del contenido armónico de la señal, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2

Como describimos en el capítulo 2 clasificamos a este equipo como Clase D según [3], al igual que el monitor de sobremesa. Citamos como característica fundamental su potencia nominal de 3.0 watts. Los límites de emisión para su clasificación son los que fueron presentados en el capítulo 1, tabla 1.11 [3].

Repetiremos el análisis que ejecutamos para calcular los valores tope para el monitor de sobremesa, quedaran los límites en la unidad de medida $\frac{mA}{W}$, estos valores los reflejaremos en las tablas 3.24 y 3.25 respectivamente.

Tabla 3.24. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D [3].

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes absolutas de las mediciones del 12 de noviembre 2019		
Orden h	Corriente armónica permisible (I_{max}) por watt. $[A/W]$	I_h (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)
3	0,0102	0,00888	0,01928	0,01951
5	0,0057	0,00814	0,01645	0,01702
7	0,003	0,00731	0,01334	0,01411
9	0,0015	0,00633	0,01069	0,01131
11	0,00105	0,00542	0,00894	0,00914
13	0,296	0,00464	0,00787	0,00765
15	0,257	0,00398	0,00678	0,00645
17	0,227	0,00353	0,00549	0,00528
19	0,203	0,00313	0,00413	0,00404
21	0,183	0,00279	0,00317	0,00298
23	0,167	0,00244	0,00281	0,00236
25	0,154	0,00210	0,00271	0,00221
27	0,143	0,00179	0,00250	0,00212
29	0,133	0,00154	0,00222	0,00195
31	0,124	0,00134	0,00204	0,00175
33	0,167	0,00120	0,00194	0,00162
35	0,11	0,00105	0,00188	0,00157
37	0,0104	0,00087	0,00168	0,00145
39	0,0099	0,00073	0,00140	0,00126

En la tabla 3.24 se comprueba que el equipo supera los límites máximos para los armónicos de orden 3º, 5º, 7º, 9º y 11º. Esto es significativo pues es un equipo de poco consumo, apenas 3 watts de potencia nominal, sin embargo, es un equipo doméstico imprescindible.

En la tabla 3.25 que corresponde con el segundo día de toma de muestras se repiten los resultados. Se superan los límites para los armónicos de orden 3º, 5º, 7º, 9º y 11º. Que se repitan estos datos en el segundo día de toma de muestras nos indica que el equipo no cumple con la normativa, aunque sería prudente repetir esta prueba varias ocasiones más para certificarlo.

Los resultados son muy interesantes, se podía observar cuando representamos en el dominio frecuencia la señal que estaba distorsionada, aunque no nos aseguraba que superaría los límites dispuestos para la Clase D según [3].

Como conclusión podríamos decir que el equipo supera los límites dispuestos por [3], por lo cual es un factor de riesgo en nuestra red para el resto de los equipos que conectemos a ellos. Se propone continuar esta investigación con este equipo, repitiendo en varios días más, para certificar los resultados. También utilizar móviles

de diferentes marcas, gamas, potencia nominal, conectarlos en paralelo, pues el cargador de móvil que usamos tenía varios años de uso. Profundizar en esta investigación sería muy interesante, pues los móviles son parte de nuestra vida diaria, en casa, el trabajo, a todas partes que vamos.

Tabla 3.25. Análisis de valores de la distorsión armónica de la señal de corriente del equipo con respecto a los límites establecidos para los equipos clase D [3].

Valores de la norma UNE-EN 61000-3-2		Valores de las amplitudes absolutas de las mediciones del 13 de noviembre 2019		
Orden h	Corriente armónica permisible (I_{max}) por watt. $[A/W]$	I_h (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)
3	0,0102	0,01939	0,01955	0,01708
5	0,0057	0,01632	0,01656	0,01450
7	0,003	0,01285	0,01323	0,01163
9	0,0015	0,00978	0,01026	0,00908
11	0,00105	0,00778	0,00816	0,00729
13	0,296	0,00674	0,00682	0,00618
15	0,257	0,00587	0,00563	0,00516
17	0,227	0,00486	0,00434	0,00401
19	0,203	0,00380	0,00311	0,00285
21	0,183	0,00304	0,00244	0,00204
23	0,167	0,00275	0,00234	0,00180
25	0,154	0,00260	0,00232	0,00181
27	0,143	0,00235	0,00217	0,00171
29	0,133	0,00197	0,00192	0,00154
31	0,124	0,00169	0,00175	0,00138
33	0,167	0,00148	0,00167	0,00132
35	0,11	0,00136	0,00156	0,00127
37	0,0104	0,00119	0,00131	0,00112
39	0,0099	0,00098	0,00105	0,00089

3.3.5.4 Análisis y representación en diagramas polares de los armónicos de la señal

Los resultados más interesantes los hemos obtenido con este equipo, realizaremos un análisis polar y su correspondiente representación en diagramas polares. Presentamos inicialmente los valores de los armónicos con sus valores de fase en las tablas 3.26 y 3.27. A primera vista notamos que los valores de amplitud y fase de los horarios de la tarde son muy cercanos, por lo que esto se notara en la representación polar.

Tabla 3.26. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11º.

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 13 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30a m)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,009832	9,667044	0,021488	13,114499	0,021517	11,962099
3	0,008886	209,025515	0,019275	220,464997	0,019510	216,940318
5	0,008139	49,127239	0,016452	70,034258	0,017017	63,656468
7	0,007308	250,325113	0,013344	-76,816371	0,014110	-87,376781
9	0,006333	93,338315	0,010689	141,558103	0,011309	125,714775
11	0,005421	-61,578940	0,008939	3,078990	0,009144	-17,679478

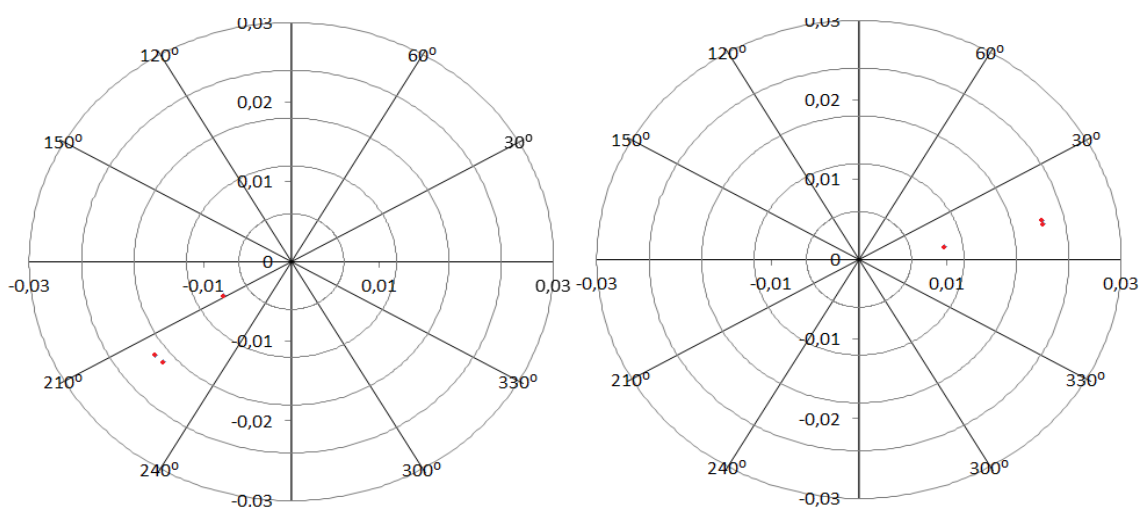


Figura 3.23 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre del 2019.

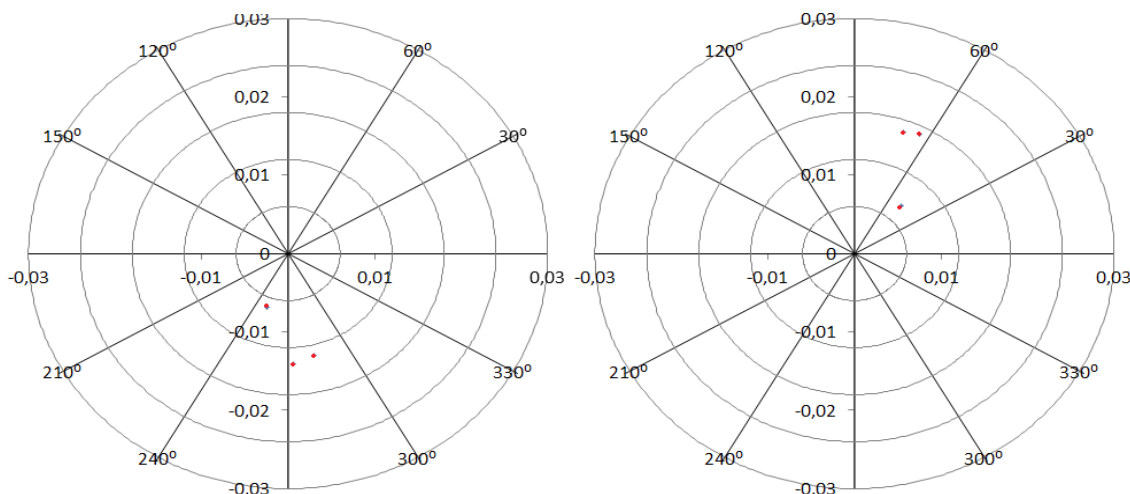


Figura 3.24 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 12 de noviembre de 2019.

En las figuras 3.23 y 3.24 podemos observar como siempre existen 2 puntos que se encuentran muy cercanos, estas son las representaciones de los horarios de las 03:00 pm y 08:00 pm.

En la representación de los armónicos 9° y 11° en la figura 3.25 se aprecia algo similar a lo descrito anteriormente para los armónicos inferiores.

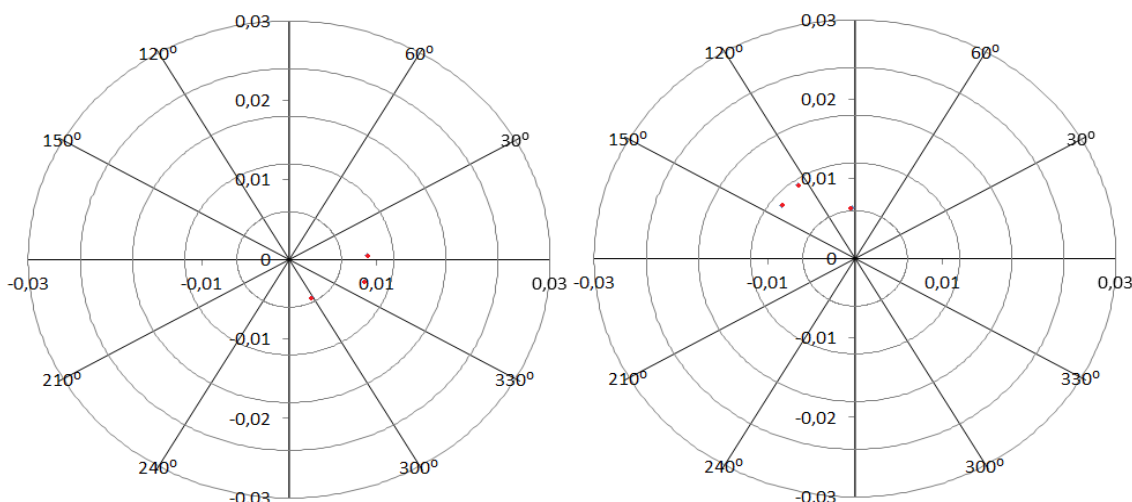


Figura 3.25 Representación de los armónicos de orden 9° y 11° , de derecha a izquierda respectivamente, día 12 noviembre de 2019.

Pasaremos a representar los valores obtenidos para el día 13 de noviembre. Para este día los valores son muy cercanos en amplitud y fase para los diferentes armónicos, según lo plasmado en la tabla 3.27.

Tabla 3.27. Valores de amplitud y fase en los 3 horarios, para los armónicos impares desde el fundamental hasta armónico de orden 11° .

Valores de las amplitudes y fases de mediciones del 13 de noviembre 2019						
Orden h	I_h (08:30 am)	Fase (08:30 am)	I_h (03:00 pm)	Fase (03:00 pm)	I_h (08:00 pm)	Fase (08:00 pm)
1	0,021699	11,512489	0,021796	12,789868	0,019150	11,853966
3	0,019390	215,442844	0,019545	219,225682	0,017079	216,748875
5	0,016316	61,581311	0,016564	67,877048	0,014503	63,671230
7	0,012846	-88,657127	0,013229	-80,225860	0,011634	-86,139787
9	0,009781	127,180080	0,010264	136,991013	0,009078	129,157528
11	0,007783	-11,340487	0,008164	-1,987155	0,007289	-11,463595

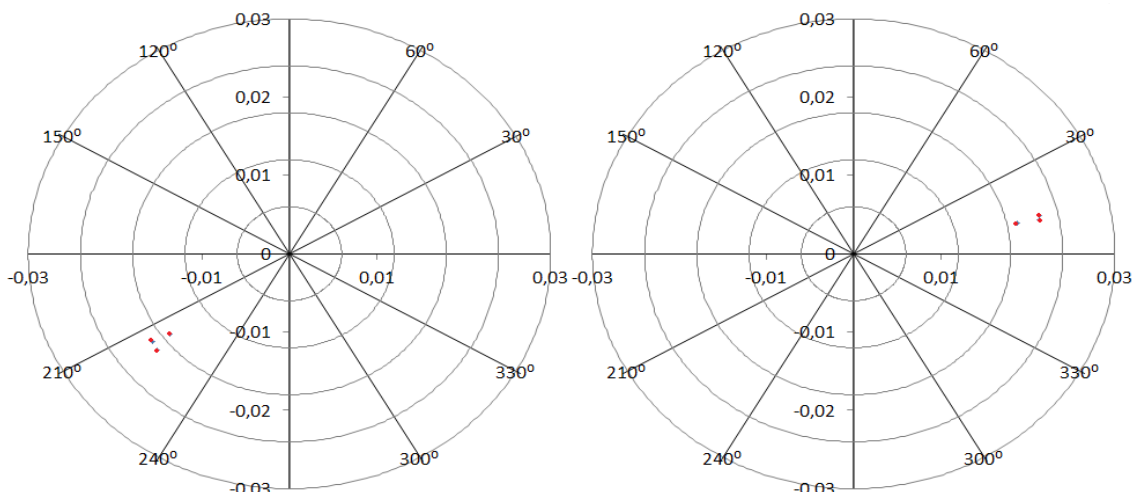


Figura 3.26 Representación de la componente fundamental y el armónico 3º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre del 2019.

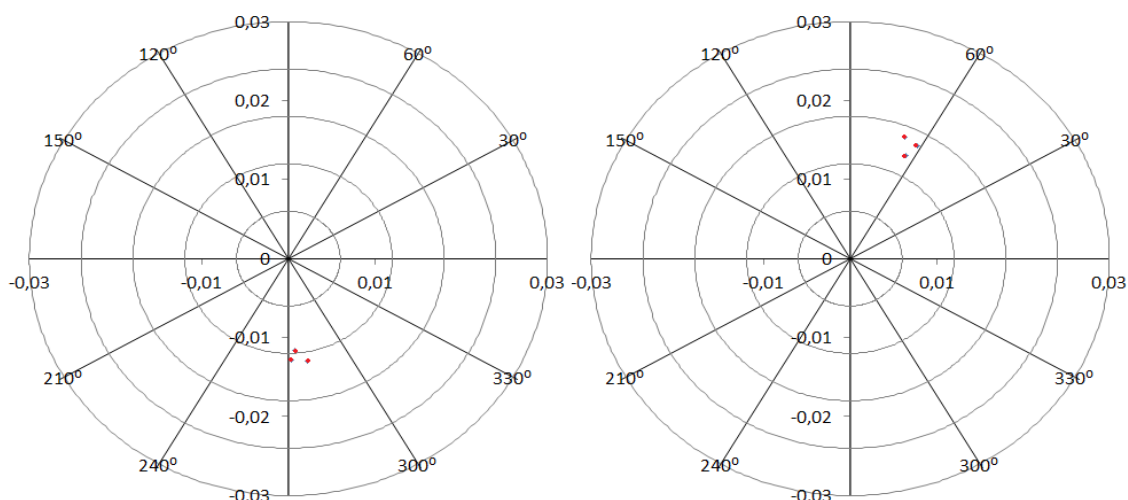


Figura 3.27 Representación del 5º y 7º armónico, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 de noviembre de 2019.

En las representaciones de las figuras 3.26 y 3.27 podemos observar lo que planteamos en el párrafo anterior. En el diagrama correspondiente a la componente fundamental coinciden prácticamente los valores de los horarios de 08:30 am y 03:00 pm, en el resto de los diagramas no distan mucho de si los puntos.

En la figura 3.28 se aprecia algo similar a lo explicado antes con los demás diagramas. Las medidas tomadas en este día para los diferentes horarios no variaron mucho ni en amplitud, ni fase lo cual es muy interesante. Queda la incógnita de si extendiéramos esta investigación durante más días, en los mismos horarios los resultados serían los mismos.

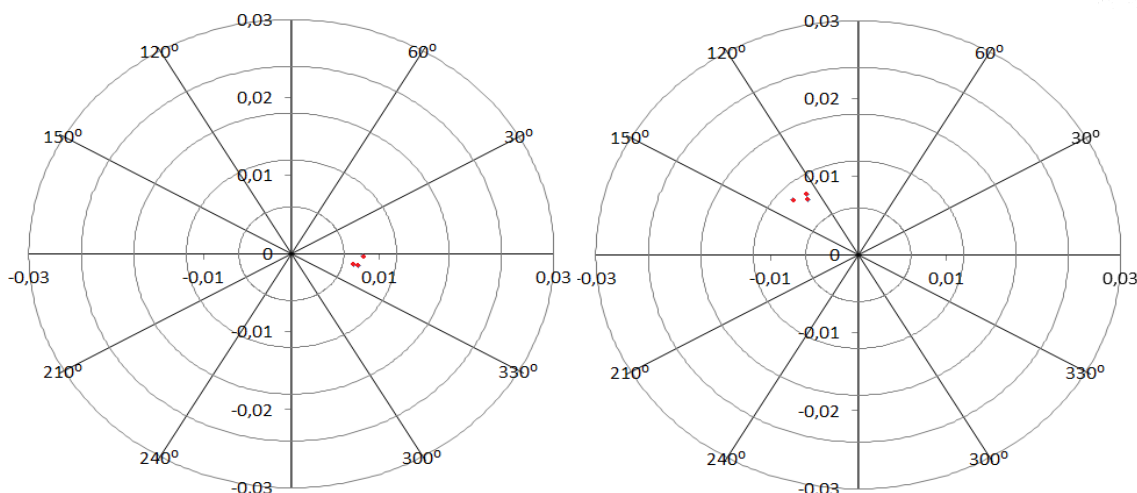


Figura 3.28 Representación de los armónicos de orden 9º y 11º, de derecha a izquierda respectivamente, día 13 noviembre de 2019.

3.3.5.5 Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THD_g y THD_I

El proceso para el cálculo de los grupos armónicos y los índices THD_g , y THD_I se realizará de manera similar a como se hizo con el monitor de sobremesa. No procede comparar los valores de las amplitudes relativas vs los HG, por ser este equipo perteneciente a la Clase D según [3].

Tabla 3.28: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , para ambos días de las mediciones en %.

Día	Horario	THD_g	THD_I
12-nov	08:30 am	192,54	192,29
	03:00 pm	163,16	162,69
	08:00 pm	165,94	165,28
13-nov	08:30 am	156,58	154,55
	03:00 pm	155,63	155,35
	08:00 pm	159,86	155,45

Los valores obtenidos evidencian lo reflejado en el epígrafe 3.3.5.3, cuando se analizó el contenido armónico de la señal y si cumplía o no con los límites establecidos en [3]. En ambos días se sobrepasaron los límites máximos, por lo cual los resultados que se presentan en la tabla 3.28 corroboran lo anterior y viceversa.

Podríamos concluir que la señal de corriente de este equipo está muy distorsionada, además que el equipo no cumple con la Norma UNE-EN 61000-3-2. No obstante sería prudente continuar el estudio más a fondo con este equipo en específico, tomando más muestras como ya hemos expresado antes.

3.3.6 Análisis de las medidas tomadas en el cargador de móvil. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz

El proceder en este apartado será el mismo que el realizado con las cargas anteriores, calcularemos los índices THD_g y THD_I para los diferentes rangos de frecuencia y posteriormente los compararemos. En la tabla 3.29 presentamos los resultados para el día 12 de noviembre.

Tabla 3.29: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_I
08:30 am	0-2 kHz	191,628	153,785
	2-9 kHz (HF)	11,834	2,024
03:00 pm	0-2 kHz	162,413	140,814
	2-9 kHz (HF)	9,057	1,968
08:00 pm	0-2 kHz	165,741	133,066
	2-9 kHz (HF)	6,967	1,407

Los valores obtenidos reflejan un poco más de lo sucedido cuando analizamos las mediciones que se obtuvieron utilizando una señal de muestreo de 8 kHz, en este caso se muestreo a 120 kHz y los resultados son similares. La señal esta distorsionada con valores de THD_I superiores a los 100 puntos porcentuales para el rango de 0-2 kHz, el THD_g también toma valores de riesgo. Para el rango de 2-9 kHz no sucede algo diferente la señal muestra que continua distorsionada, con valores de THD_I entre 1,5-2,0 % de distorsión, superiores como es de suponer para el THD_g .

Tabla 3.30: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.

Horario del día	Frecuencia	Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g	Distorsión armónica total THD_I
08:30 am	0-2 kHz	155,316	135,441
	2-9 kHz (HF)	6,559	1,129
03:00 pm	0-2 kHz	151,461	130,992
	2-9 kHz (HF)	7,248	1,760
08:00 pm	0-2 kHz	158,223	123,642
	2-9 kHz (HF)	6,488	2,129

La tendencia se repite para el día 13 de nov, los resultados se asemejan a los del día anterior. Como conclusión podríamos decir que este equipo distorsiona de manera considerable la señal de la red, no son suficientes las pruebas que se realizaron, pero las tomas de muestras realizadas durante estos días nos evidencian esto. Se propones continuar la investigación con este equipo durante varios días, para

certificarlo, utilizar otros móviles de otras gamas a su vez para tener otros puntos de comparación.

3.3.7 Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 0 a 2 kHz

Como ya se explicó en secciones anteriores después de tomar las medidas a las cargas individualmente, se tomaron combinado las mismas primero de dos en dos y posteriormente con las tres cargas funcionando simultáneamente. El objetivo de este proceso era analizar que ocurría cuando funcionaban paralelamente las mismas.

Este proceder se ha practicado por varios investigadores, por ejemplo en [7] y [9], donde se ejecuta la medición de varias lámparas al mismo tiempo. En el artículo [5] se aplica este proceder a varios equipos de diferente tipo en paralelo, posteriormente se evalúan los resultados, estudiando los efectos del fenómeno de diversidad, la atenuación o agravamiento de los niveles de distorsión por el funcionamiento de varias cargas simultáneamente.

A lo largo de este documento hemos explicado que la norma UNE-EN 61000-3-2 clasifica los equipos en cuatro clases (A-D), y establece niveles de emisión máximos para estas. Sin embargo, no se menciona límites, ni proceder para cuando funcionan cargas de diferente clase simultáneamente en paralelo, por lo que la evaluación de nuestros resultados será acorde al proceder en los artículos [5], [7] y [9].

Estudiaremos cuatro combinaciones de cargas, en tres de las mismas estará presente la luminaria por lo cual utilizaremos como base los límites máximos establecidos para la clase C según la UNE-EN 61000-3-2, hasta el armónico de orden 15. Además evaluaremos los niveles de distorsión armónica obteniendo los índices THD_g y THD_L . Para la última combinación de cargas en la cual no estará involucrada la luminaria utilizaremos los límites establecidos para la Clase D según [3]. Esto lo realizaremos en el rango de frecuencia de 0-2 kHz, y representaremos la señal en el dominio frecuencia y el dominio tiempo.

3.3.7.1 Representación de la señal en el dominio del tiempo

Al igual que en epígrafes anteriores representaremos una muestra de la señal de corriente, usando la herramienta Labview. La señal que se representa fue tomada en el horario de las 08:30 am del día 12 de noviembre. La señal de corriente es la correspondiente a la combinación de cargas luminaria + monitor + cargador de móvil.

La forma de onda se asemeja a un diente de sierra en lugar de la señal original de la Red. Esto nos da una idea de que puede existir distorsión armónica presente en la misma.

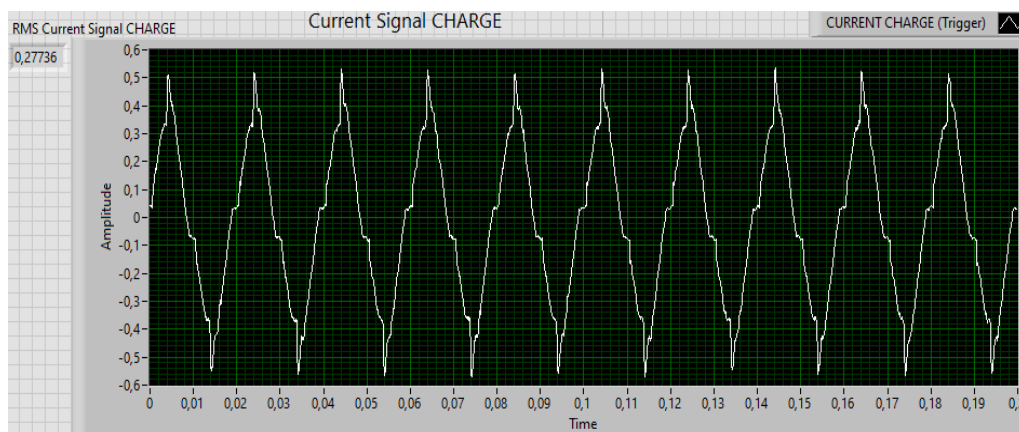


Figura 3.29: Representación de la señal de la corriente que fluye en luminaria + monitor + cargador de móvil, en el dominio del tiempo y su valor rms.

3.3.7.2 Representación de la señal en el dominio frecuencia aplicando la DFT

En esta sección con la representación de la señal en el dominio de la frecuencia observaremos con más detalle los armónicos de diferente orden. Nuestra escala en el eje de las ordenadas es 0.4, se observa en la figura como el armónico de orden 3º supera este valor al igual que el principal. Además, se evidencia que el contenido armónico es sustancial, la imagen nos muestra como los armónicos 7º, 11º y 13º poseen gran cantidad de energía. Nos obstante esto lo corroboraremos en las secciones posteriores.

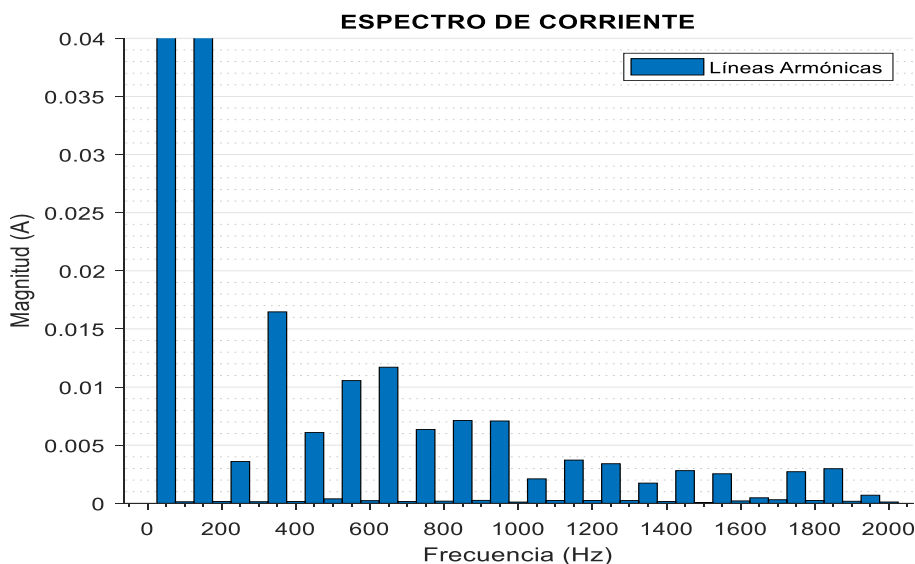


Figura 3.30 Representación de la señal de la corriente que fluye en luminaria + monitor + cargador de móvil, en el dominio de frecuencia tras aplicar la DFT.

3.3.7.3 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinaciones de equipos Clase C

Para no extender esta sección plasmamos los resultados de las muestras que fueron tomadas el día 12 de nov, ubicando los valores por horarios. Los valores de los armónicos son en % con respecto al armónico fundamental. Podemos observar claramente que al combinar las cargas la distorsión armónica se incrementa, tanto en la tabla 3.32 como en la 3.33, se evidencia que se superan los valores obtenidos con la luminaria. En la tabla 3.32 destacamos la combinación de la luminaria con el monitor de mesa, para este caso se superan los límites máximos para los armónicos de orden 5º, 7º, 9º y 11º.

Tabla 3.31: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:30 am, día 12 de noviembre.

Equipos	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Límites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,779	6,658	1,926	2,204	1,291	1,508	0,903
lumin. + cargad.	17,315	0,494	6,842	2,889	4,489	4,267	1,992
lumin. + monit.	28,411	15,387	15,327	9,506	6,092	1,796	2,244
lumin. + monit. + cargad.	17,731	1,343	6,083	2,258	3,909	4,334	2,383

Resulta interesante que los valores de las tres cargas combinadas sean inferiores a los del caso anterior, pudiera decirse que existe efecto de cancelación en este caso, pero nuestra conclusión no es definitiva.

Para la tabla 3.32 los valores obtenidos anteriormente se repiten, excepto los de la combinación luminaria + monitor para este caso los valores de distorsión son mucho menores. En general para todas las combinaciones de los equipos se incrementa la distorsión armónica si comparamos con los resultados individuales de la luminaria. Las muestras de este horario en ninguna combinación superan los límites máximos establecidos en [3].

Tabla 3.32: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 03:00 pm, día 12 de noviembre.

<i>Equipos</i>	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Limites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,857	7,052	2,169	2,494	1,418	1,008	0,320
lumin. + cargad.	17,108	1,675	5,987	3,884	3,358	3,875	2,192
lumin. + monit.	11,366	7,031	2,369	2,670	1,151	1,200	0,273
lumin. + monit. + cargad.	17,459	0,492	5,154	3,114	2,741	3,975	2,643

En los resultados del horario 08:00 pm mostrados en la tabla 3.33, para la combinación luminaria + monitor se obtienen valores muy similares a los de la tabla 3.31 correspondiente al horario de la mañana. Para esta combinación nuevamente se superan los límites máximos en los armónicos de orden 5°, 7°, 9° y 11°. Coincide que la combinación de las 3 cargas es inferior a la luminaria + monitor.

Tabla 3.33: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:00 pm, día 12 de noviembre.

<i>Equipos</i>	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Limites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,661	7,220	2,184	2,183	1,199	0,904	0,592
lumin. + cargad.	16,183	2,979	6,308	3,410	3,864	3,727	2,085
lumin. + monit.	28,330	14,761	15,180	8,922	5,783	2,109	2,802
lumin. + monit. + cargad.	15,895	2,512	5,727	1,225	3,199	2,577	1,701

Los resultados correspondientes al día 13 de noviembre, los presentamos en el Anexo 1. Para este día los valores de la combinación luminaria + monitor en los tres horarios son muy similares, en todos los casos superan los límites máximos para los armónicos

de orden 5º, 7º, 9º y 11º. Se reitera la tendencia de que en todas las combinaciones se incrementa la distorsión armónica con respecto a la muestra individual de la luminaria.

Para este día en la combinación de las tres cargas no existe cancelación alguna en los horarios de las 03:00 pm y 08:00 pm, obteniéndose resultados del resto de las combinaciones. Además, que se superan los topes establecidos en [3] para los armónicos de orden 3º, 5º, 7º, 9º y 11º.

3.3.7.4 Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THD_g y THD_I

Luego de calcular los grupos armónicos para las muestras tomadas en las diferentes combinaciones de cargas, obtuvimos los índices THD_g , y THD_I . Presentaremos los resultados en las tablas 3.34 y 3.35 respectivamente. Recordamos que para calcular los grupos armónicos tomamos desde el armónico fundamental hasta el de orden 40, pues en la sección anterior solo se analizó hasta el armónico 15º.

Tabla 3.34: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.

Equipos	08:30am		03:00pm		08:00pm	
	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I
luminaria	13,369	13,312	13,683	13,602	13,532	13,463
luminaria + cargad.	20,505	20,448	19,942	19,892	19,404	18,508
luminaria + monit.	38,164	38,064	14,160	14,043	37,687	37,644
lumin. + monit + cargad.	20,573	20,494	19,862	19,796	18,347	18,296

En la tabla 3.34 se observa como en cada una de las combinaciones se superan los valores THD_g y THD_I de manera individual. Esta tabla corresponde a las muestras tomadas en día 12 de noviembre, por lo que se evidencia lo explicado en la sección anterior.

Se corrobora que armónico por armónico se superan los valores de la luminaria individualmente. Los resultados de la combinación luminaria + monitor, los índices para sus muestras son superiores al resto, inclusive para la combinación donde están las tres cargas. Esto fueron los resultados que se obtuvieron para este día, estos índices respaldan lo que presentamos anteriormente.

Para el día 13 de noviembre los valores fueron algo diferentes, estos los presentamos en la tabla 3.35. Los resultados obtenidos se corresponden con lo explicado en la sección anterior para este día.

La combinación luminaria + monitor + cargador de móvil en dos horarios presenta una distorsión muy grande, superior al resto de las combinaciones. La combinación luminaria + monitor tiene valores muy similares en los tres horarios. Por tanto, se

corroborar lo que presentamos en la sección anterior cuando explicamos lo sucedido este día.

A modo de conclusión resumimos que es necesario continuar con el estudio de cargas combinadas, con ello se podrá apreciar con más detalle el efecto de cancelación. Este efecto lo pudimos observar en varios horarios, por ejemplo, en el día 12 en todos y en día 13 a las 08:30 am. Se propone extender los días de las mediciones, tomar como base al menos 15 días, para posteriormente evaluar los resultados y obtener una conclusión más certera.

Tabla 3.35: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.

Equipos	08:30 am		03:00 pm		08:00 pm	
	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I
luminaria	13,682	13,558	13,742	13,639	13,689	13,564
luminaria + cargad.	20,280	20,181	13,843	13,713	19,494	19,243
luminaria + monit.	37,442	36,682	36,237	35,959	36,971	36,795
lumin. + monit. + cargad.	19,756	19,558	38,647	38,515	39,385	39,193

3.3.7.5 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase D

En esta última combinación de cargas como ya indicamos en secciones anteriores se utilizará los límites establecidos para la Clase D según [3], debido a que ambas cargas pertenecen a dicha Clase.

Este tipo de análisis es diferente al ejecutado en el epígrafe anterior, pues para la Clase C se comprueba la cantidad de energía que posee un armónico con respecto al fundamental. Cuando se analiza esto último se esclarece mucho más cual es el grado de distorsión armónica que posee una señal, porque lo ideal en cualquier señal es la energía solo esté presente en el armónico fundamental.

Presentaremos en esta sección los resultados de un solo día, el resto se reflejará en el Anexo 2, no obstante, se analizarán los mismos. Los valores que se presentarán serán los correspondientes al día 13 de noviembre, en los 3 horarios que se tomaron las muestras.

En la tabla 3.36 observamos que los valores de la combinación monitor + cargador de móvil son superiores a los tomados de manera individual en el monitor, para cada uno de los armónicos. Se repite la tendencia analizada en secciones anteriores donde cuando se combina las cargas aumenta la distorsión armónica. Para los armónicos de orden 7º y 9º se superan los valores máximos.

Tabla 3.36: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:30 am, día 13 de noviembre.

Equipos	08:30 am						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. $[A/W]$	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,00252	0,00351	0,00312	0,00220	0,00173	0,00182	0,00109
monit. + cargad.	0,07802	0,06092	0,04005	0,02080	0,00565	0,00258	0,00497

Tanto en la tabla 3.37 como en la 3.38 se pueden observar los mismos resultados, continúa la tendencia al incremento de la distorsión cuando se combinan las cargas. En ambas tablas se destacan los valores de los armónicos de orden 7º y 9º que superan los límites. Los resultados para este día en los tres horarios son muy similares.

Tabla 3.37: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 03:00 pm, día 13 de noviembre.

Equipos	03:00pm						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. $[A/W]$	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,03228	0,02928	0,02442	0,01869	0,01251	0,00742	0,00304
monit. + cargad.	0,07974	0,06350	0,04404	0,02551	0,01040	0,00230	0,00398

Los resultados del día 12 de noviembre son muy similares a los presentados en las tablas anteriores. Se reitera el aumento de la distorsión armónica en las cargas combinadas. En los horarios de las 03:00 pm y 08:00 pm los valores de los armónicos de orden 7º y 9º superan los límites máximos. En resumen, los resultados tienen las mismas características.

Tabla 3.38: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:00 pm, día 13 de noviembre.

Equipos	08:00pm						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. $[A/W]$	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,03196	0,02882	0,02376	0,01784	0,01168	0,00664	0,00269
monit. + cargad.	0,07877	0,06238	0,04257	0,02408	0,00909	0,00208	0,00464

3.3.7.6 Cálculo de los grupos armónicos y de los índices THD_g y THD_I

Posterior al cálculo de los HG para la combinación de equipos monitor + cargador de móvil, obtuvimos los índices THD_g y THD_I . Presentaremos los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 3.39: Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %.

Equipos	08:30 am		03:00 pm		08:00 pm	
	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I
monitor	52,826	48,405	151,813	151,294	150,023	148,771
cargador de móvil	156,584	154,548	155,630	155,347	159,856	155,452
monitor + cargador	122,490	122,013	126,857	126,678	126,142	124,811

Los valores de los índices THD_g y THD_I para esta combinación son inferiores a los de las muestras de los equipos de manera individual, este resultado es muy peculiar.

Como explicamos anteriormente el análisis de una señal tomando el método orientado para la Clase D, no nos brinda ilumina del todo con respecto al grado de distorsión que pueda tener una señal. Sin embargo, lo utilizamos porque ambas cargas pertenecen a esta Clase. Los índices THD_g y THD_I si nos indican de manera clara cuál es el grado de distorsión que se presenta en una señal.

Tabla 3.40 Valores de los índices Tasa de Distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %.

Equipos	08:30 am		03:00 pm		08:00 pm	
	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I	THD_g	THD_I
monitor	148,695	110,408	45,623	44,276	44,192	43,196
cargador de móvil	192,535	192,294	163,158	162,690	165,941	165,277
monitor + cargador	111,055	110,408	123,722	123,580	130,912	130,787

En la tabla 3.40 que corresponde al día 12 de noviembre se obtienen resultados muy similares a los del día anterior. Los valores de la combinación se mantienen muy cercanos a los de la tabla 3.39. Sin embargo, los índices de distorsión siguen siendo mayores en las cargas individuales que cuando se combinan.

Reiteramos que es necesario continuar el estudio de las cargas combinadas para tener una respuesta más certera sobre su comportamiento.

3.3.8 Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz.

Para el análisis en el rango de frecuencia de 2-9 kHz obtendremos los grupos armónicos, posteriormente evaluaremos la distorsión armónica calculando los índices THD_g y THD_I . Este proceder será para las muestras tomadas a una frecuencia de muestreo de 120 kHz.

Posteriormente analizaremos el contenido espectral en las combinaciones de equipos, comparando los valores de 0-2 kHz, luego de 2-9 kHz en los diferentes horarios.

Tabla 3.41: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 08:30 am.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	18,287	1,6950	16,676	0,415
luminaria + monit.	37,764	1,5811	35,290	0,356
monitor + cargador	110,944	6,548	90,236	0,964
luminaria + monit. + cargador	18,916	1,7474	16,612	0,476

A pesar de que se tomaron las muestras a diferente frecuencia (120 kHz) a lo realizado en epígrafes anteriores (frecuencia de muestro de 8 kHz), los resultados fueron muy similares. Reiteramos que el análisis por encima de 2 kHz no tiene un proceder definido en ninguna de las normativas estudiadas.

Los valores nos muestran que la distorsión armónica es superior en la combinación monitor + cargador de móvil. Esta tendencia se repite en los tres horarios que se tomaron las muestras, los cuales presentamos en las tablas 3.41, 3.42 y 3.43 respectivamente. Los valores son superiores para esta combinación tanto de THD_g como de THD_I .

Tabla 3.42: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 03:00 pm.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	38,274	1,1684	36,454	0,408
luminaria + monit.	13,986	1,010	0,415	13,194
monitor + cargador	123,405	4,339	116,714	1,050
luminaria + monit. + cargador	38,274	1,1662	36,454	0,408

Se puede observar que existe un efecto de cancelación cuando se combinan los 3 equipos (luminaria +monitor + cargador de móvil), esto es muy interesante pues lo que se supondría más lógico es que a más equipos funcionando en paralelo mayor distorsión armónica. Este efecto está presente en los tres horarios analizados.

Tabla 3.43: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 12 de noviembre del 2019 en %, horario 08:00 pm.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	37,635	1,503	34,722	0,381
luminaria + monit.	20,155	1,4838	18,255	0,424
monitor + cargador	130,654	4,220	114,783	0,920
luminaria + monit. + cargador	20,083	1,446	18,132	0,305

En el horario de las 08:00 pm se obtuvieron los peores valores de distorsión para la combinación monitor + cargador de móvil, esto se evidencia en el valor del THD_g .

De manera general observamos que en las combinaciones de los equipos las emisiones armónicas en el rango de 2-9 kHz no son muy grandes, aunque no dejan de estar presentes. A vez se observa que existe un gran reparto de la energía en los interarmónicos, porque las diferencias de valores entre el THD_g y THD_I son sustanciales. El THD_g toma valores de 1.5-6.5, sin embargo el THD_I oscila entre 0,3-1,1; con lo que se evidencia que es necesario un estudio más a fondo de los interarmónicos por encima de los 2 kHz.

Los resultados correspondientes al día 13 de noviembre se reflejan en las tablas que se encuentran en el Anexo 3. Para las muestras de este día persiste lo explicado antes. Se propone continuar con este estudio, incrementado los días de toma de muestras, de este modo se tendría más datos para emitir conclusiones más certeras. Expandir el período de toma de muestras, apoyándonos en lo descrito en la norma UNE-EN 61000-4-30.

3.4 Referencias del capítulo 3

- [1] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 61000-4-7:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM) Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas". (2004).
- [2] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 50160: 2011 Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". (2011).
- [3] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN IEC 61000-3-2:2019 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)". (2019).
- [4] Asociación Española de Normalización. "UNE-EN 61000-4-30:2015 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro". (2015)
- [5] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales". IEEE Latin America Transactions, Vol 3, No. 5, December 2005.
- [6] Greverer, Anne & Meyer, Jan & Rönnerberg, Sarah & Bollen, Math & Myrzik, J.M.A. "Survey of supraharmmonic emission of household appliances". CIREN - Open Access Proceedings Journal. 2017. 870-874. 10.1049/oap-cired.2017.0458. (2017).
- [7] E. O. A. Larsson, C. M. Lundmark and M. H. J. Bollen, "Measurement of current taken by fluorescent lights in the frequency range 2-150 kHz", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que., 2006, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/PES.2006.1709417. (2006).
- [8] Putz, & Bednarek, & Nawrowski. "Disturbances Generated by Lighting Systems with LED Lamps and the Reduction in Their Impacts". Applied Sciences. 9. 4894. 10.3390/app9224894. (2019).
- [9] Larsson, Anders & Lundmark, C. & Bollen, Math. "Distortion of Fluorescent Lamps in the Frequency Range 2-150 kHz". submitted to ICHQP, October 2006, Cascais, Portugal. (2006).

4. Conclusiones

En el presente Trabajo Fin de Master hemos desarrollado una labor de investigación sobre la emisión espectral de cargas eléctricas domésticas conectadas en redes de suministro de energía eléctrica de baja tensión. De este modo, este TFM se sitúa dentro del área de investigación de Power Quality o Calidad del Suministro Eléctrico.

Este trabajo abarca un estudio teórico del estado del arte en este campo de investigación, así como un desarrollo experimental para la obtención de medidas de laboratorio con cargas específicas en una red de baja tensión, junto con la posterior evaluación crítica de estas medidas para obtener conclusiones sobre sus características. El método de trabajo desarrollado puede ser generalizable a otras cargas conectadas en otras redes eléctricas. A continuación, exponemos las diferentes líneas y ámbitos de investigación que hemos desarrollado, así como las conclusiones obtenidas.

Estudio bibliográfico

A través del presente trabajo se ha realizado un estudio de la normativa referente a la distorsión armónica, tanto en la red de suministro, como la que puede ser emitida por un equipo que se conecte a esta. A modo de resumen podemos decir que, como normas para la red de suministro se estudió y en este documento se describe la UNE-EN 50160 para las redes europeas y la IEEE 519-2014 para el espacio americano. Estos documentos establecen los límites máximos de distorsión armónica que puede presentar una red de suministro de energía eléctrica para los diferentes armónicos, sin embargo, queda pendiente por estas el normar los valores admisibles para los interarmónicos y el espectro superior a 2 kHz.

Como normativa que limita los valores de emisión de los equipos que se conecten a la red de suministro europea, se estudió la norma UNE-EN 61000-3-2. Este documento ha sido fundamental para nuestro trabajo pues clasifica los equipos en cuatro clases, para finalmente establecer los límites en base a las mismas. Sin embargo, queda pendiente a su vez establecer límites en el mismo para los interarmónicos, también para el espectro de 2 kHz a 150 kHz. La norma establece que el método adecuado a aplicar para comprobar que las emisiones de los equipos son tolerables es el descrito en la norma UNE-EN 61000-4-7.

Se realizó una breve reseña de la norma UNE-EN 61000-4-30. Esta norma establece los métodos para la medida de los parámetros de calidad de redes de suministro de energía eléctrica. Este documento establece dos clases fundamentales para evaluar dichos parámetros. Se señala como uno de los parámetros de calidad a los armónicos e interarmónicos de tensión, además define que la medición de los mismos se realizara mediante UNE-EN 61000-4-7.

Por último, se estudió la norma UNE-EN 61000-4-7, la cual constituye la base fundamental de nuestro TFM. En pocas palabras en el documento se describe como realizar un instrumento de medida para evaluar los armónicos e interarmónicos, como

agrupar los mismos en grupos y subgrupos; también como calcular los índices correspondientes a los mismos, etc. En el mismo se traza como deberá ser la medición del espectro armónico de 2 kHz a 9 kHz; esto ha servido de mapa para muchos artículos e investigaciones que se están llevando a cabo en la llamada alta frecuencia.

A lo largo de este trabajo hemos querido mostrar la importancia de la calidad de la energía eléctrica, para los usuarios finales que consumen la energía, aunque también es de suma importancia para el distribuidor de la misma. Son varios los parámetros de calidad para describir una red de suministro, por lo que realizar una investigación que abarque la totalidad de los mismos sería una tarea compleja y que excedería los límites del trabajo de investigación para un TFM. En nuestro trabajo nos hemos centrado en un aspecto de especial importancia: los armónicos e interarmónicos, su definición, origen y consecuencias negativas.

A través del estudio de diferentes artículos obtenidos de bases de datos como IEEEExplore, Scopus e Engineering Village, citados a lo largo de la memoria, hemos trazado nuestra investigación para profundizar en el estudio de este campo. A través del análisis de los artículos escogidos se realizó un review sobre el tema.

Del estudio bibliográfico realizado se constató que existe mucha documentación acerca de las emisiones armónicas en alta frecuencia para lámparas, sin embargo para el resto de los equipos no es así. Las combinaciones de cargas no han sido muy estudiadas a pesar de que en la práctica es algo extremadamente frecuente.

Queda mucho por descubrir en el mismo, más aún por normar, con el avance de la electrónica, el aumento de los equipos que poseen cargas no lineales y el auge de las energías renovables, por lo cual es necesario ampliar las investigaciones en este campo, sobre todo en el espectro de 2 kHz a 150 kHz.

Desarrollo experimental

Con el objetivo de estudiar unas cargas eléctricas y electrónicas del ámbito doméstico se diseñó e implementó un dispositivo experimental, tomando como guía de referencia la norma UNE-EN 61000-4-7, para la medida de emisiones armónicas, tanto de la red de suministro como en las cargas que se conecten a esta.

El instrumento de medida virtual creado consta de una parte hardware y otra software. La parte del hardware está conformada por dos piezas fundamentales: un transformador de medida de efecto Hall y una tarjeta de adquisición de datos. Se implementaron dos circuitos de acondicionamiento; uno para monitorizar las medidas de la señal de tensión de la red de suministro y otro para la señal de corriente de la carga.

El software desarrollado está basado en el entorno de programación LabVIEW de National Instruments; para ello hemos aprendido y desarrollado capacidades de programación en este lenguaje. Podemos citar algunas de las tareas que ejecuta nuestra VI:

- ✓ Se compensa el efecto que introduce el transformador de medida y el circuito de acondicionamiento para la medida de la tensión de la Red.
- ✓ Se compensa el efecto que introduce el transformador de medida y el circuito de acondicionamiento para la medida de la corriente en la carga.
- ✓ Se controla la tarjeta de adquisición de datos, visualizando cada uno de sus señales de entrada y salida. Se configura a través del mismo la frecuencia de muestreo y el tiempo de adquisición; en este caso se muestreó a 8 kHz y a 120 kHz con un tiempo en ambos casos de 1 segundo.
- ✓ Se controla la entrada del PLL a la tarjeta de adquisición y cómo funcionará el mismo, con flancos de subida o de bajada.
- ✓ Se captura la señal de tensión de la red de suministro y la señal de corriente de la carga de manera simultánea y se guarda en un fichero ambas señales.
- ✓ Se detecta el cruce por cero de la señal de tensión de la red de suministro.
- ✓ Se toma un segmento de 200 ms de señal de tensión de la red y de la señal de corriente de la carga que se guarda en otro fichero.
- ✓ Se aplica la DFT a las señales de tensión de la red y de corriente de la carga y los resultados se guardan en el anterior fichero.

Medidas experimentales

Utilizando el instrumento virtual se han realizado medidas a tres equipos seleccionados por un uso muy frecuente en la sociedad actualmente:

- ✓ Luminaria con dos lámparas fluorescentes, con una potencia nominal de 52 Watts y un factor de potencia de 0,95.
- ✓ Monitor para computador de sobremesa, marca BenQ, con una potencia de nominal de 40 Watts.
- ✓ Cargador de móvil, marca BQ, de potencia nominal 3 watts.

Se realizaron medidas los días 12 y 13 de noviembre del 2019; ejecutándose en los horarios 08:30 am, 03:00 pm y 08:00 pm. Se utilizaron dos frecuencias de muestreo distintas:

- ✓ 8 kHz para analizar las señales en el rango espectral de 0 a 2 kHz.
- ✓ 120 kHz para el rango espectral de 2 kHz a 9 kHz.

En cada caso, se tomaron medidas de la forma de onda de la señal de corriente y se aplicó la DFT a las señales capturadas conectando:

- ✓ cada una de las cargas individualmente,
- ✓ cada una de las combinaciones de pares de cargas,
- ✓ las tres cargas simultáneamente.

Sobre los resultados de la DFT se calcularon los grupos armónicos utilizando el software Excel de Microsoft.

- Análisis en el rango de frecuencia de 0 a 2 kHz. Cargas individuales.

Posteriormente se evaluó la distorsión armónica hallando la Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y la Tasa de distorsión armónica total THD_I . Se analizó los valores de las amplitudes relativas de los diferentes armónicos con el armónico fundamental en valores porcentuales.

Se compararon los resultados con los límites máximos de emisión armónica establecidos en la norma UNE-EN 61000-3-2.

Realizando un breve resumen de los resultados en las cargas de manera individual se puede concluir lo siguiente.

Los resultados de las mediciones en la luminaria y la comparación con los límites máximos de la UNE-EN 61000-3-2, arrojaron que no se superan los topes establecidos para ningún armónico. Se presentaron los más críticos, coincidiendo los mismos en los dos días que se realizaron las mediciones. En el horario de las 08:00 pm los valores de emisión fueron menores que en el resto de los horarios, esto se produjo en ambos días.

Al analizar la influencia de la Red en los valores obtenidos se concluyó que pudiera haber afectado, aunque esto no es posible certificarlo puesto que no se realiza esta medición con otra señal de alimentación y otras características espectrales.

Con este equipo se realizó un análisis más exhaustivo, debido a que se comparó los valores de los Grupos Armónicos (HG) vs las amplitudes relativas (I_h) de los diferentes horarios. Evidenciando que los HG tienen mayor valor de energía, porque contienen la que se encuentra repartida en los interarmónicos.

Los valores obtenidos de THD_I y THD_g fueron moderados, de hecho fueron los menores de los tres equipos analizados.

Tanto el monitor como el cargador de móvil con carga lo clasificamos como Clase D, según la norma UNE-EN 61000-3-2, por lo que el análisis de los límites con respecto a la misma no se ejecuta del mismo modo que la luminaria que es Clase C.

Para el monitor luego de analizar los resultados de las emisiones armónicas con respecto a UNE-EN 61000-3-2, se evidencia que no se superan los topes máximos. Esto se repite en ambos días, en los tres horarios estudiados. Para esta carga no se observó influencia de la red en la emisión armónica del equipo.

Los valores obtenidos de THD_I y THD_g no fueron discretos para este equipo, fueron superiores a los 100 puntos %, en tres horarios (uno en el día 12-nov y dos para el día 13-nov). Luego de revisar la literatura encontramos dos artículos donde se destacaba que el THD_I podía ser superior al 100 %, en uno de ellos lo mencionaban con datos que habían obtenido de manera experimental en mediciones realizadas.

El análisis realizado al equipo cargador de móvil arrojó desde su representación en el dominio del tiempo, que la señal estaba distorsionada, pues su forma de onda distaba mucho de la señal original de la red. En la representación en el dominio de la frecuencia, se observó con claridad cómo se repartía la energía en los armónicos de diferente orden, de manera descendente.

Al revisar los niveles de emisión de los armónicos con respecto a los límites establecidos en la UNE-EN 61000-3-2, se mostró que efectivamente los niveles de distorsión superaban los límites. Los armónicos de orden 3°, 5°, 7°, 9° y 11° superaron los toques, en los tres horarios que se realizaron las pruebas, y en los dos días de mediciones. Con estos resultados se corroboró lo que ya se había observado en las representaciones en los dominios tiempo y frecuencia. Esto es significativo pues es un equipo de poco consumo, apenas 3 watts de potencia nominal.

Los valores obtenidos de THD_I y THD_g fueron los mayores de las tres cargas estudiadas individualmente, superando los 100 puntos % en todos los horarios, en los 2 días que se tomaron las medidas. Estos resultados nos prueban una vez más que el análisis anterior para comprobar si la señal está o no distorsionada es correcto y viceversa.

Podríamos concluir que la señal de corriente de este equipo está muy distorsionada, además que el equipo no cumple con la Norma UNE-EN 61000-3-2. No obstante sería prudente continuar el estudio más a fondo con este equipo en específico, tomando más muestras durante varios días, para elaborar una respuesta más precisa evaluando los resultados. Además se propone utilizar móviles de diferentes marcas, gamas, potencia nominal, conectarlos en paralelo, etc. Profundizar en esta investigación sería muy interesante, pues los móviles son parte de nuestra vida diaria.

- Análisis en el rango de frecuencia de 0 a 2 kHz. Combinaciones de cargas.

Se efectuaron medidas a combinaciones de cargas, primero de dos en dos y posteriormente con las tres cargas funcionando simultáneamente. El objetivo de este proceso era analizar que ocurría cuando funcionaban paralelamente las mismas.

Este proceder se ha ejecutado por varios investigadores, esto se describió en el capítulo 1 cuando se hizo un breve resumen de varios artículos. Como ya hemos explicado a lo largo del presente trabajo la norma UNE-EN 61000-3-2 clasifica los equipos en cuatro clases (A-D), y establece niveles de emisión máximos para estas.

Sin embargo, no se menciona límites ni proceder para cuando funcionan cargas de diferente clase simultáneamente en paralelo, por este motivo la evaluación de los resultados se ejecutó acorde a lo presentado en los artículos analizados en el capítulo 1.

Se estudió cuatro combinaciones de cargas; en tres de las mismas estará presente la luminaria por lo cual utilizaremos como base los límites máximos establecidos para la

clase C según la UNE-EN 61000-3-2, hasta el armónico de orden 15°. El análisis con esta clase proporciona más claridad, por eso se escogió. Se evaluó los niveles de distorsión armónica obteniendo los índices THD_g y THD_I .

Para la última combinación de cargas en la cual no estaba involucrada la luminaria se utilizó los límites establecidos para la Clase D.

Con los resultados obtenidos de estas combinaciones de cargas, se compararon las emisiones armónicas, además se comparó con los correspondientes a la luminaria. Como conclusión podemos decir que la distorsión armónica se incrementa cuando funcionan varias cargas en paralelo, sin embargo, se observa el fenómeno de cancelación. Cuando funcionan los tres equipos simultáneamente no es cuando se observa mayor distorsión armónica sino en la combinación luminaria + monitor. El fenómeno de la cancelación de cargas, ya fue mencionado en uno de los artículos que se revisaron en el capítulo 1. Este patrón se observó en los tres horarios durante los dos días de mediciones, es decir, no fue un resultado aislado.

Los resultados de la combinación monitor + cargador de móvil se compararon con los tomados en el monitor aisladamente. Arroja que cuando funcionan las cargas en paralelo la distorsión armónica es superior a cuando los equipos funcionan individualmente. Se calcularon los índices THD_g y THD_I , recordamos que para calcular los mismos se toma desde el armónico fundamental hasta el de orden 40°, pues el análisis anterior solo se ejecutó hasta el armónico 15°.

En los resultados del día 12 de noviembre la combinación luminaria + monitor los índices THD_g y THD_I son superiores al resto de las combinaciones. Respaldando el análisis que se realizó anteriormente.

Los resultados del día 13 de noviembre fueron diferentes, la combinación luminaria + monitor + cargador de móvil en dos horarios presenta una distorsión superior al resto de las combinaciones.

A modo de conclusión resumimos que es necesario continuar con el estudio de cargas combinadas, con ello se podrá apreciar con más detalle el efecto de cancelación. Este efecto lo pudimos observar en varios horarios, por ejemplo, en el día 12 en todos y en día 13 a las 08:30 am. Se propone extender los días de las mediciones, tomar como base al menos 15 días, para posteriormente evaluar los resultados y obtener una conclusión más certera.

- Análisis en el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz. Cargas individuales.

Se calcularon dos agrupamientos: uno para el rango de frecuencia de 0 a 2 kHz y otro para el rango de 2 kHz a 9 kHz, esto se ejecutó conforme a lo descrito en la norma UNE-EN 61000-4-7. Con estos datos se evaluó el contenido armónico hallando el THD_g , y el THD_I , los valores obtenidos para ambos rangos se compararon.

Los niveles de distorsión obtenidos en la luminaria fueron mayores en el primer día de las mediciones. Como se esperaba los valores de THD_g y THD_I en el rango de 0-2 kHz fueron superiores a los del rango 2-9 kHz. También se evidenció que los THD_g son superiores a los del THD_I , para ambos rangos de frecuencia ya que contienen la energía correspondiente a los interarmónicos.

La conclusión que podemos obtener de estos resultados es que existe gran contenido armónico que se reparte en los interarmónicos en alta frecuencia. Este último dato es significativo ya que aunque en la normativa se describen, no se establece límite alguno para estos. La distorsión armónica disminuye para la alta frecuencia, pero está presente y no es depreciable en la luminaria. Los valores de distorsión son moderados para este equipo en alta frecuencia.

Los resultados para el monitor de sobremesa fueron los esperados, muy similares en ambos días para la alta frecuencia. Los niveles de distorsión presentados por este en el rango de 0-2 kHz fueron superiores a los de la luminaria. Por tanto se esperaba que los valores de THD_g y THD_I en alta frecuencia también fueran superiores, y esto fue lo que se obtuvo. Para el THD_g los valores oscilaron entre 1.8-4.1 %, para el THD_I entre 0.5-1.02 %. Sin embargo, si comparamos las emisiones del monitor de 0-2 kHz con las de 2-9 kHz, podríamos decir que son muy inferiores. Resumimos nuestro análisis expresando lo mismo que con la luminaria: la distorsión armónica disminuye para la alta frecuencia, pero está presente y no es depreciable.

El cargador de móvil fue el equipo que presentó más distorsión armónica en el rango de 0-2 kHz de los tres que se analizaron. Por tanto esta tendencia se mantuvo y se comprobó con los resultados de THD_g y THD_I . Para el THD_g los valores oscilaron entre 6.4-11.8 %, para el THD_I entre 1.1-2.1 %. Estos valores de distorsión son inferiores en comparación con los obtenidos para el rango de 0-2 kHz, pero consideramos que son elevados para alta frecuencia.

Resumiendo, concluimos que el equipo que presenta mayor distorsión en alta frecuencia es el cargador de móvil. También existe un pequeño vínculo entre las emisiones en el rango de 0-2 kHz con las de 2-9 kHz, porque el aumento de la primera implica el aumento de la segunda.

- Análisis en el rango de frecuencia de 2 kHz a 9 kHz. Cargas combinadas.

El análisis de alta frecuencia para las cargas combinadas lo ejecutamos con el siguiente procedimiento. Se calcularon los valores de THD_g y THD_I de todas las combinaciones y luego se compararon los valores.

Los resultados fueron muy interesantes, se evidenció el efecto cancelación, el cual se había reflejado en el análisis de 0-2 kHz. Esto lo observamos cuando comparamos los

valores de THD_g y THD_I de la combinación luminaria + monitor + cargador de móvil vs monitor + cargador de móvil. A pesar de que son tres equipos los que funcionan simultáneamente sus valores de distorsión son menores que en la combinación monitor + cargador de móvil. También es significativo que la emisión armónica sea menor en la combinación monitor + cargador de móvil que cuando funciona individualmente el cargador de móvil.

Es necesario continuar con la investigación con estos equipos, incrementar el número de días de las mediciones, utilizar otros para establecer un mayor rango para comparar los resultados.

Desarrollo personal y profesional como investigador

A través de este TFM he profundizado en mis competencias relacionadas con la investigación, la electrónica, la electricidad y la programación. Bajo la tutela de mi director de TFM he crecido como ingeniero, guiándome para llegar a investigar de forma autónoma. Las competencias y habilidades en este trabajo y que podrán ser potenciadas en futuros trabajos de investigación se pueden resumir en:

- Búsqueda y estudio de forma crítica de artículos y normas en bases de datos, que me han permitido adquirir conocimiento del contexto del trabajo de investigación que me habían propuesto llevar a cabo.
- Trabajo experimental en laboratorio; el uso de instrumentos de medida y generación como multímetros, cautines, fuentes de alimentación de directa y alterna, entre otros que han aumentado mi pasión por la electrónica y la electricidad.
- Desarrollo de software para instrumentación mediante tarjetas de adquisición de datos, que me ha introducido en la programación de computadores.
- Análisis crítico de las medidas y resultados experimentales confrontándolos con la bibliografía y normativa vigente en el área.

Con este trabajo me he especializado en el campo de la calidad de la energía eléctrica, específicamente en la medida de armónicos e interarmónicos, centrándome en la normativa relacionada con este parámetro de calidad de las redes de suministro de energía eléctrica y para los equipos que se conecten a ella, rangos de frecuencia en los cuales existen límites máximos para los armónicos, equipos que provocan este fenómeno, también los equipos que son sensibles a la distorsión armónica, sus efectos nocivos, etc. Aunque en este trabajo no se ha tratado qué medidas se pueden tomar para contrarrestar este fenómeno, sí que formaron parte del estudio bibliográfico realizado para escribir este documento.

Trabajos de investigación futuros

Inicialmente estaba planeado realizarse este proyecto utilizando una fuente de alimentación programable que simula una red eléctrica de baja tensión. Con ella pretendía aplicar a las cargas señales de alimentación de contenido espectral programado, pudiendo así caracterizarlas de forma estricta. Lamentablemente, cuando ya había desarrollado parte del trabajo experimental y estaba listo para ejecutar las primeras medidas el equipo se averió y por circunstancias económicas no era viable ni su reparación ni su sustitución. Por este motivo, en lugar de utilizar dicha fuente pasamos a utilizar la red de suministro, lo cual significaba tomar medidas para caracterizar unas cargas utilizando señales de test no controladas, aunque sí que eran absolutamente reales y fidedignas a las condiciones de trabajo reales de esas cargas.

La reparación o sustitución de la fuente programable sería un factor que abriría una futura investigación sobre este tema y la obtención de resultados. Con ese equipo la investigación se enriquecería exponencialmente, pues para citar uno de sus beneficios se puede introducir distorsión armónica de diferentes grados a la señal eléctrica que esta genera y ver como esto influye en la señal de corriente que se mide en una o varias cargas.

En el futuro, de todas las posibles líneas de investigación abiertas en este TFM resultaría especialmente interesante profundizar sobre la emisión armónica de cargas domésticas en el rango de frecuencia de 2 kHz a 150 kHz, ampliando un poco más nuestra investigación en el espectro de frecuencia. Como ya se ha explicado en varias ocasiones a través de este texto la llamada alta frecuencia aún no tiene límites de emisión en la normativa, es terreno fértil y virgen para explorar.

Con este proyecto solo se mide la corriente de una luminaria funcionando, sería interesante ver el comportamiento de varias, si se evidencia o no el fenómeno de cancelación de la distorsión por conexión de cargas similares en paralelo, etc. Este experimento se podría realizar en varios horarios del día y alargarlo a más de una semana de mediciones. El periodo de observación que se tomó fue de solo un segundo, pero podría extenderse y ver cómo cambia el espectro armónico si luego de estar funcionando una carga se conecta o desconecta en el mismo punto de suministro una o varias cargas más, para evaluar posteriormente los resultados.

Algo que podría ser una ampliación directa de esta investigación es la llamada representación en el dominio tiempo-frecuencia, utilizando como herramienta la STFT la cual nos permitiría observar los cambios de los contenidos espectrales cada medio ciclo de la señal. Este análisis sería muy interesante aplicarlo en el rango de 2 kHz a 150 kHz; si contáramos con la fuente de alimentación se incrementaría notablemente el valor de nuestra investigación.

En la bibliografía estudiada no encontramos mucha información sobre el análisis de las fases cuando se toman las medidas, aunque en este trabajo se tocó este tema no se profundizó como se debería, continuar esta investigación sería recomendable y esclarecedor.

Por último, pero no menos importante sería un objetivo incluir a la Universidad de Cantabria en el proyecto PANDA (equiPment hArmoNic DAtabase). En este proyecto se utiliza su página web como repositorio donde se almacena e intercambian, mediciones armónicas de una gran variedad de equipos domésticos (con corriente nominal por debajo de 16 A). Actualmente participan solo dos universidades españolas. Incluir la Universidad de Cantabria sería un éxito ya que nos permitiría tener acceso a esta base de datos, aumentar el ámbito de difusión de esta Universidad además de tener más recursos para continuar la investigación en esta área.

5. Anexos

5.1 Anexo 1 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase C

Tabla 5.1: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:30 am, día 13 de noviembre.

<i>Equipos</i>	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Limites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,435	7,653	2,170	2,315	1,211	1,628	0,668
lumin. + cargad.	17,253	0,999	6,142	3,638	3,806	4,678	2,074
lumin. + monit.	28,617	15,411	14,257	7,825	4,242	1,540	3,103
lumin. + monit. + cargad.	17,396	0,956	4,856	2,698	3,179	4,738	2,210

Tabla 5.2: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 03:00 pm, día 13 de noviembre.

<i>Equipos</i>	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Limites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,846	7,317	2,290	2,179	1,357	1,212	0,343
lumin. + cargad.	10,988	7,361	2,181	2,081	1,243	1,181	0,409
lumin. + monit.	27,843	13,718	14,501	7,851	5,496	1,597	2,733
lumin. + monit. + cargad.	31,504	14,669	14,277	5,929	3,553	1,546	2,140

Tabla 5.3: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente en los equipos con respecto a los límites establecidos para la Clase C según [3]. Horario 08:00 pm, día 13 de noviembre.

<i>Equipos</i>	Amplitudes relativas (I_h) para los armónicos de varios órdenes con respecto al armónico fundamental en %.						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
Limites según [3]	28,5	10	7	5	3	3	3
lumin.	10,855	7,335	2,019	2,109	1,436	1,028	0,415
lumin. + cargad.	17,114	1,978	5,654	3,555	2,969	3,372	1,819
lumin. + monit.	28,128	13,943	14,970	8,292	5,885	2,052	2,534
lumin. + monit. + cargad.	31,940	14,945	14,563	6,357	3,904	0,993	1,455

5.2 Anexo 2 Análisis del contenido armónico de las señales, aplicando la Norma UNE-EN 61000-3-2. Combinación de equipos clase D.

Tabla 5.4: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:30 am, día 12 de noviembre.

Equipos	08:30 am						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. $[A/W]$	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,01266	0,01122	0,00834	0,00682	0,00461	0,00408	0,00372
monit. + cargad.	0,01269	0,01125	0,00836	0,00688	0,00465	0,00410	0,00375

Tabla 5.5: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 03:00 pm, día 12 de noviembre.

Equipos	03:00 pm						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. $[A/W]$	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,00254	0,00331	0,00312	0,00223	0,00165	0,00155	0,00107
monit. + cargad.	0,07809	0,06152	0,04112	0,02254	0,00772	0,00341	0,00632

Tabla 5.6: Análisis de los valores de distorsión armónica de la señal de la corriente con respecto a los límites establecidos para la Clase D según [3]. Horario 08:00 pm, día 12 de noviembre.

<i>Equipos</i>	08:00 pm						
	$I_h 3^\circ$	$I_h 5^\circ$	$I_h 7^\circ$	$I_h 9^\circ$	$I_h 11^\circ$	$I_h 13^\circ$	$I_h 15^\circ$
I_{max} por watt. [A/W]	0,136	0,076	0,04	0,02	0,014	0,296	0,257
monit.	0,00247	0,00336	0,00263	0,00215	0,00159	0,00147	0,00115
monit. + cargad.	0,07939	0,06476	0,04632	0,02848	0,01257	0,00402	0,00535

5.3 Anexo 3 Análisis de las medidas tomadas en las combinaciones de equipos. Rango de frecuencia de 2KHz a 9KHz

Tabla 5.7: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %, horario 08:30 am.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	20,747	1,701	17,935	0,461
luminaria + monit.	37,462	1,513	33,846	0,533
monitor + cargador	122,103	4,058	111,680	0,894
luminaria + monit. + cargador	17,013	1,4556	15,406	0,477

Tabla 5.8: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %, horario 03:00 pm.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	19,346	1,355	17,563	0,345
luminaria + monit.	36,388	1,388	33,570	0,405
monitor + cargador	135,321	3,552	125,386	0,633
luminaria + monit. + cargador	19,370	1,3490	17,823	0,438

Tabla 5.9: Valores de los índices Tasa de distorsión total de un grupo armónico THD_g y Tasa de Distorsión armónica total THD_I , correspondientes al día 13 de noviembre del 2019 en %, horario 08:00 pm.

Combinación de Equipos	THD_g (0-2 kHz)	THD_g (2-9 kHz)	THD_I (0-2 kHz)	THD_I (2-9 kHz)
luminaria + cargador	19,635	1,356	17,767	0,443
luminaria + monit.	19,635	1,356	17,767	0,443
monitor + cargador	136,242	3,7194	117,447	0,923
luminaria + monit. + cargador	40,300	1,4097	35,416	0,348

5.4 ANEXO 4 Hoja de características de la resistencia de medida R_m

Type HOLCO Series



The Holco range of Precision Metal Film Resistors meets the requirement for economically priced components for industrial and military applications. The manufacturing facility utilises closely controlled production processes including the sputter coating of metal alloy films to ceramic substrates, and laser spiralling to achieve close tolerance and high stability resistors. An epoxy coating is applied for environmental and mechanical protection. Commercially the Series is available in two case sizes, from 1 ohm to 4M ohms, tolerances from 0.05% to 1% and TCR's from 5ppm/°C to 100ppm/°C. Offered with release to BS CECC 40101 004, 030 and 804 the H8 is available via distribution.

Key Features

- Ultra Precision - Down To 0.05%
- Matched Sets Available To 2ppm/°C
- High Pulse Withstand
- Low Reactance
- Low TCR - Down To 5ppm/°C
- Long Term Stability
- Up To 1 Watt At 70°C
- Released To CECC 40101 004, 030 And 804

Characteristics - Electrical

	H4P	H4	H8	
BS CECC 40101 004				
Style:		K	H	J
Power Rating at 70°C:		0.25W	0.063W	0.125W
Temperature Rise (max):		32°C	14°C	28°C
LimitingElementVoltage:		250V	200V	200V
BS CECC 40101 030				
Style:		J	H	
Power Rating at 125°C:		0.125W	0.1W	
Temperature Rise (max):		30°C	30°C	
LimitingElementVoltage:		250V	200V	
BS CECC 40101 804				
Style:		B	A	
Power Rating at 125°C:		0.25W	0.125W	
LimitingElementVoltage:		250V	200V	
Commercial Ratings				
Power Rating at 70°C:	1.0W	0.5W	0.25W	
Temperature Rise:	70°C	55°C	40°C	
LimitingElementVoltage:	500V	350V	350V	

General Data

Lead Material:	Solderability to BS CECC 40101 004 Para 4.15.1
Encapsulation:	Conformal Epoxy Coating
Resistor Marking:	Legend printed in accordance with CECC 40000 Para 2.4
Solvent Resistance:	The epoxy coating and print will withstand the action of all commonly used industrial cleansing solvents

Temperature Coefficient / Tolerance Ranges

TCR	H4P			H4			H8		
ppm/°C	0.05%	0.1%-0.25%	0.5%-1.0%	0.05%	0.1%-0.25%	0.5%-1.0%	0.05%	0.1%-0.25%	0.5%-1.0%
5	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K	10R-500K
10	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0
15	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0	10R-1M0
25	10R-1M0	10R-2M0	10R-2M0	10R-1M0	10R-2M0	10R-2M0	10R-1M0	10R-2M0	10R-2M0
50	10R-1M0	10R-2M0	10R-4M0	10R-1M0	10R-2M0	10R-4M0	10R-1M0	10R-2M0	10R-4M0
100	10R-1M0	1R0-2M0	1R0-4M0	10R-1M0	1R0-2M0	1R0-4M0	10R-1M0	1R0-2M0	1R0-4M0

Approved Value Ranges 40101-004, 40101-030

Type	Style 004	Style 030	Z 100ppm	C 50ppm	D 25ppm	Y 15ppm
H4	K	J	10R-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0
H8	HJ	H	10R-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0

Tolerances 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%

40101-804

Type	Style	C 50ppm	D 25ppm	T 15ppm
H4	B	49R9-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0
H8	A	49R9-1M0	49R9-1M0	49R9-1M0

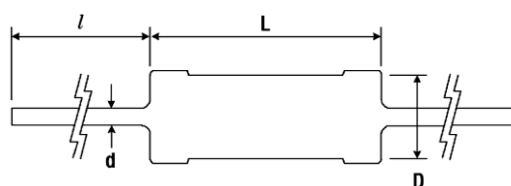
Tolerances 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%

Characteristics - Electrical

	Typical Data	Reference
Voltage Coefficient of Resistance (Between 10% and Full Rated Voltage)	Less Than 5ppm/Volt Applied	n/a
Insulation Resistance at 500 Volts	Greater Than 10^{12} Ohms	n/a
Resistance to Soldering Heat (260°C for 10 Secs.)	Less Than 0.05%	BS CECC 40101 004
Short Term Overload (6.25 Times Rated BS CECC Wattage for 5 Seconds)	Less Than 0.06%	Para 4.15.2 BS CECC 40101 004 Para 4.11
Ambient Temperature Range	-55°C to +155°C	BS CECC 40101 004,
Rapid Change of Temperature (-55°C to +155°C, 5 cycles)	Less Than 0.04%	BS CECC 40101 030 & Commercial BS CECC 40101 004 Para 4.16
Shelf Life (at Normal Room Temp.)	Less Than 0.05% Per Annum	n/a
Vibration (10-500 HZ, Amplitude 0.75mm, or Acceleration 98m/s ² which is less severe, sweep duration 6 hours)	Less Than 0.04%	BS CECC 40101 004 Para 4.19
Vibration (55-2000 Hz Simple Harmonic Motion, Max. Acceleration 98m/s ² , Duration 35±5 Minutes)	Less Than 0.04%	MIL STD 202 METHOD 204-C
Bump (390m/s ² , 4000 Bumps)	Less Than 0.03%	BS 2011 Part 2.1 Eb 1977 (1984)
Load Stability	See Graphs	n/a
Damp Heat Steady State	See Graph	BS CECC 40101 004 Para 4.21

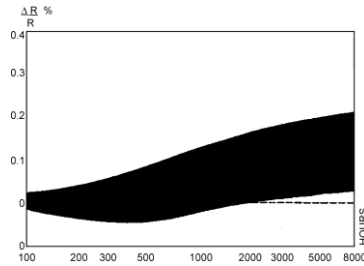
Dimensions

To prevent damage to the components conformal coating, the leads should be adequately supported during the forming process

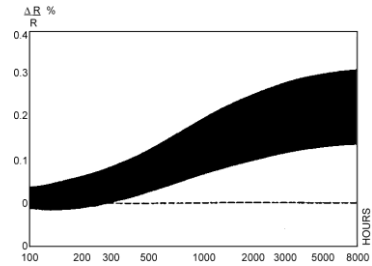


	H4P	H4	H8
Body Length (L) maximum:	10.0 mm	10.0 mm	7.20 mm
Body Diameter (D) maximum:	3.70 mm	3.70 mm	2.50 mm
Lead Diameter (d) maximum:	0.60 mm	0.60 mm	0.60 mm
Lead Length (l) nominal:	30.0 mm	30.0 mm	30.0 mm
Recommended Mounting Pitch:	12.7 mm	12.7 mm	10.2 mm
Weight (g/100 resistors)	40	40	24

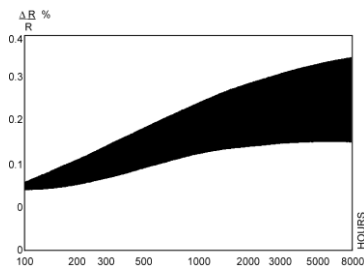
Characteristics - Long Term Stability



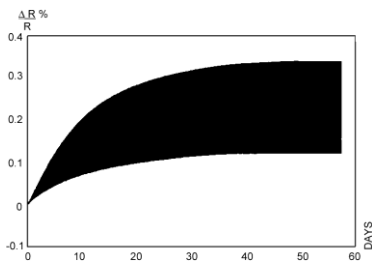
Long Term Stability
BS CECC 40101 004
Ratings at 70°C
H4 - 0.25 W
H8 - 0.125 W



Long Term Stability
BS CECC 40101 030
Ratings at 125°C
H4 - 0.125 W
H8 - 0.1 W

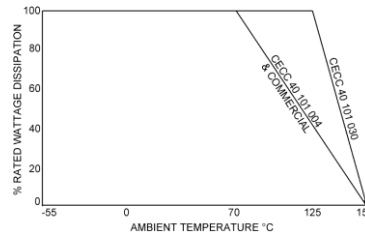


Long Term Stability
Commercial
Ratings at 125°C
H4P - 1W
H4 - 0.5 W
H8 - 0.25 W



Damp Heat Steady State
93% RH at 40°C

Derating Graph - Approved and Commercial Ratings



How to Order

H8	100R	B	Y	B
Common Part	Resistance Value	Tolerance	T.C.R. Code	Release
H4P	1.0 ohm (1000 milli ohms) 1R0	A - 0.05%	A - 5ppm	A - Part can only be sold with Commercial or C of C release.
H4	10 ohm (10 ohms) 10R	B - 0.1%	B - 10ppm	B - Part can be sold to BS CECC40101004, BS CECC 40101 030
H8	100 ohm (100 ohms) 100R	C - 0.25%	Y - 15ppm	D - Part can be sold to BS CECC40101804
	1K Ohm (1000 ohms) 1K0	D - 0.5%	D - 25ppm	
	10K ohm (10000 ohms) 10K	F - 1.0%	C - 50ppm	
	100K ohm (100000 ohms) 100K		Z - 100ppm	
	1M ohm (1000000 ohms) 1M0			

5.5 ANEXO 5 Hoja de características de la Resistencia de medida R_{dis}

Electrical Data

		WH5	WH10	WH25	WH50	Notes
Power rating at 25°C	watts	10	15	25	50*	Mounted on standard heatsink
Resistance range	ohms	0R01 to 10K	0R01 to 20K	0R01 to 44K	0R015 to 120K	
TCR (-55° to 200°C)	ppm/°C	<10Ω : ±75 ≥ to <100 : ±50 ≥100Ω : ±25				
Resistance tolerance	%	1, 2, 5, 10				
Low value limits	ohms	1 at 1%	0.5 at 2%	0.05 at 5%	0.01 at 10%	WH50 0.015 at 10%

Approved CECC 40203 - 006		AA	BA	CA	DA	
Power rating at 25°C	watts	10	15	25	40	Mounted on standard heatsink
Resistance range	ohms	0.05 to 3.4k	0.05 to 15k	0.05 to 33k	0.05 to 82k	
TCR (-55° to 200°C)	ppm/°C	≥5Ω ≤ 10Ω ± 100 >10Ω ± 50				
Resistance tolerance	%	1, 2, 5				
Low value limits	ohms	1 at 1%	0.5 at 2%	0.05 at 5%		WH50 0.015 at 10%

Limiting element voltage	volts	150	250	500	1250	
Standard values		E24 preferred range				Other values to special order
Thermal impedance	°C/watt	16.0	10.0	6.0	3.5	Mounted on standard heatsink
Ambient temperature range	°C	-55 to 200				

*For load at maximum rating mount on heatsink 30.5 cm x 30.5 cm x 1.5 mm

Construction

Cap and lead assemblies are fitted to a high purity ceramic substrate. The resistive element is wound onto the substrate and welded to the caps. The wound rod is then moulded and fitted into an aluminium housing to give optimum stability and reliability.

Marking

The resistors are legend marked with type reference, resistance value and tolerance which will withstand all accepted industrial cleaning fluids. Values are marked in accordance with IEC 62.

Terminations

Material Solder dipped, copper clad steel wire.
Strength The terminations meet the requirements of IEC 68.2.21
Solderability The terminations meet the requirements of IEC 115-1, Clause 4.17.3.2

Physical Data

Dimensions (mm)					
Type	A	B	C	E	F
	Max	±0.3	±0.3	Min	Max
WH5	30.0	12.4	11.3	1.9	17
WH10	36.5	15.9	14.3	1.9	21
WH25	51.0	19.8	18.3	2.8	28
WH50	72.5	21.4	39.7	2.8	30
Type	G	H	L	M	N
	Max	Dia ±0.2	Max	±0.5	Max
WH5	9	2.4	17.0	4.3	1.8
WH10	11	2.4	21.0	5.2	2.2
WH25	15	3.3	29.0	7.2	2.6
WH50	16	3.3	51.0	7.9	2.6

Performance Data

		CECC 40203-006	Actual		Notes
			Maximum	Typical	
Load at commercial rating: 1000 hrs at 25°C	ΔR %	1.0	1.0	0.4	
Load at CECC rating: 1000 hours at 25°C	ΔR %	1.0	1.0	0.4	
Dry heat: 1000 hours at 200°C	ΔR %	1.0	1.0	0.4	
Derating from 25°C		Zero at 200°C			
Short term overload	ΔR %	1.0	1.0	0.2	
Climatic sequence	ΔR %	1.0	1.0	0.4	
Climatic category		55/200/56			
Long term damp heat	ΔR %	1.0	0.5	0.2	
Temperature rapid change	ΔR %	0.25	0.25	0.1	
Resistance to solder heat	ΔR %	0.25	0.25	0.05	
Vibration and bump	ΔR %	0.25	0.25	0-0.25	
Noise (in decade of frequency)	μV/V	Not specified	zero	zero	
Insulation resistance.	ohms	>1Gohm	>20Tohm	>100Gohm	
Isolation voltage : WH5 and 10	volts AC peak	1000 min	1500 min		See application notes
: WH25 and 50	volts AC peak	2000 min	3000 min		
Pulse handling		Data available by request			

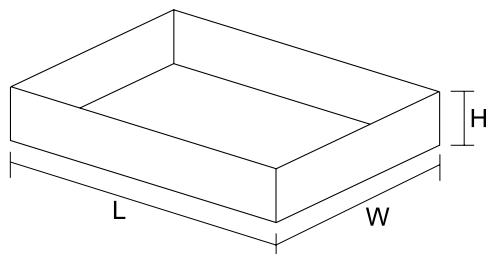
Application Notes

Reference aluminium heatsink dimension

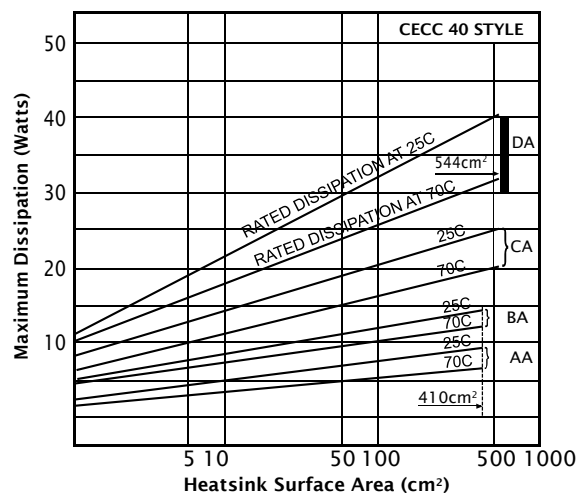
CECC 40203-006	L cm	W cm	H cm	Reference area sq. cm
AA (WH5)	15.5	10	5	410
BA (WH10)				
CA (WH25)	18	13	5	544
DA (WH50)				

Aluminium thickness 1mm

Reference chassis



Graph 1



WH50 only

To load at maximum commercial rating (50W) mount on heatsink 30.5cm x 30.5cm x 1.5mm.

Derating must be applied when resistors are mounted on a heat sink of smaller dimensions than defined in Graph 1.

It is recommended that the resistor base should be coated with heatsink compound before mounting to obtain the stated operating characteristics.

The heatsink compound increases thermal conductivity to the heatsink.

After soldering care should be taken to ensure that there are no flux residues on the moulding compound, otherwise insulation resistance will be reduced.

Packaging

Resistors are packed in plastic bags and boxed for maximum protection.

5.6 ANEXO 6 Hoja de características de la resistencia de medida del Transductor de corriente LA 25-NP (IPN = 5-6-8-12-25 At)

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	25	At
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 36	At
R_M	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$ $R_{M \min}$ $R_{M \max}$	
	with $\pm 15\text{ V}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$ $R_{M \min}$ $R_{M \max}$	
	@ $\pm 25\text{ At}_{\max}$	100	320
	@ $\pm 36\text{ At}_{\max}$	100	190
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA
K_N	Conversion ratio	1-2-3-4-5 : 1000	
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	Current consumption	$10 + I_S$	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.5	%
\mathcal{E}_L	Linearity error	< 0.2	%
I_O	Offset current ¹⁾ @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ ± 0.05	Max ± 0.15 mA

I_{OM}	Magnetic offset current ²⁾ @ $I = 0$ and specified R_M , after an overload of $3 \times I_{PN}$	$\pm 0.05 \pm 0.15$	mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	$0^\circ\text{C} \dots +25^\circ\text{C}$ $\pm 0.06 \pm 0.25$ mA $+25^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$ $\pm 0.10 \pm 0.35$ mA $-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$ ± 0.5 mA $-40^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$ ± 1.2 mA	
t_r	Response time ³⁾ to 90 % of I_{PN} step	< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed	> 50	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)	DC .. 150	kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	$-40 \dots +85$	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	$-45 \dots +90$	$^\circ\text{C}$
R_P	Primary coil resistance per turn @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	< 1.25	m Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
	@ $T_A = 85^\circ\text{C}$	115	Ω
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 V, $T_A = 25^\circ\text{C}$	> 1500	M Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Notes: ¹⁾ Measurement carried out after 15 mn functioning

²⁾ The result of the coercive field of the magnetic circuit

³⁾ With a di/dt of 100 A/ μs .

Current Transducer LA 25-NP

Isolation characteristics

V_d	Rms voltage for AC insulation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	9	kV
		Min	
dCp	Creepage distance	10.63	mm
dCl	Clearance	10.63	mm
CTI	Comparative Tracking Index (group IIIa)	175	

Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCl, \hat{V}_w	Rated insulation voltage	Nominal voltage
Basic insulation	1700 V	1700 V
Reinforced insulation	600 V	600 V

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

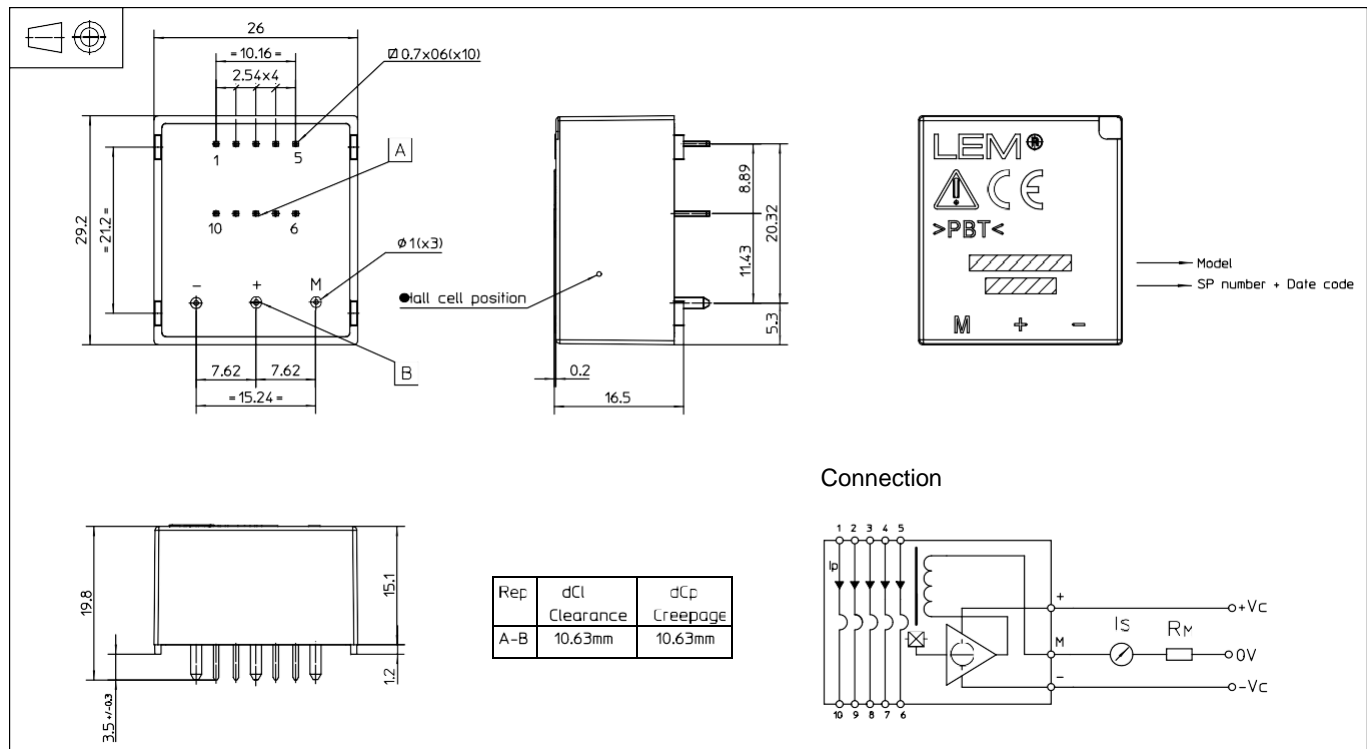
Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.

Dimensions LA 25-NP (in mm)



Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_P [mΩ]	Primary insertion inductance L_P [μH]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_P [A]					
1	25	36	25	1 / 1000	0.3	0.023	<div> IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10 </div>
2	12	18	24	2 / 1000	1.1	0.09	<div> IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10 </div>
3	8	12	24	3 / 1000	2.5	0.21	<div> IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10 </div>
4	6	9	24	4 / 1000	4.4	0.37	<div> IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10 </div>
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	<div> IN 5 4 3 2 1 OUT 6 7 8 9 10 </div>

Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 10 pins 0.7 x 0.6 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins $\varnothing 1$ mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

Remarks

- I_S is positive when I_P flows from terminals 1, 2, 3, 4, 5 to terminals 10, 9, 8, 7, 6.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

5.7 ANEXO 7 Hoja de características de la resistencia de medida del Transductor de voltaje LV 25-P ($V_{pn} = 10..500V$)

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal rms current	10	mA
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA
R_M	Measuring resistance	$R_{M \min}$ $R_{M \max}$	
	with $\pm 12 V$ @ $\pm 10 mA_{\max}$	30 190	Ω
	@ $\pm 14 mA_{\max}$	30 100	Ω
	with $\pm 15 V$ @ $\pm 10 mA_{\max}$	100 350	Ω
	@ $\pm 14 mA_{\max}$	100 190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal rms current	25	mA
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000	
U_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 .. 15$	V
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 V$) + I_S	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ C$ @ $\pm 12 .. 15 V$	± 0.9	%
	@ $\pm 15 V (\pm 5\%)$	± 0.8	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.2	%
		Typ Max	
I_O	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ C$	± 0.15	mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O 0 $^\circ C .. + 25^\circ C$	± 0.06 ± 0.25	mA
	+ 25 $^\circ C .. + 70^\circ C$	± 0.10 ± 0.35	mA
t_r	Step response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN}	40	μs

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	$^\circ C$
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	$^\circ C$
R_P	Resistance of primary winding @ $T_A = 70^\circ C$	250	Ω
R_S	Resistance of secondary winding @ $T_A = 70^\circ C$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997 UL 508: 2010	

Note: ¹⁾ $R_1 = 25 k\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_1 which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Voltage Transducer LV 25-P

Insulation coordination

U_d	Rms voltage for AC insulation test, 50 Hz, 1 min	2.5 ¹⁾	kV
\hat{U}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	16	kV
		Min	
d_{cp}	Creepage distance	19.5	mm
d_{cl}	Clearance	19.5	mm
CTI	Comparative tracking index (group IIIa)	175	

Note: ¹⁾ Between primary and secondary.

Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
d_{cp}, d_{cl}, U_w	Rated insulation voltage	Nominal voltage
Basic insulation	1600 V	1600 V
Reinforced insulation	800 V	800 V

Safety

This transducer must be used in limited-energy secondary circuits according to IEC 61010-1.



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.

UL 508:Ratings and assumptions of certification

File # E189713 Volume: 2 Section: 1

Standards

- CSA C22.2 NO. 14 - 10 INDUSTRIAL CONTROL EQUIPMENT - Edition 11 - Revision Date 2011/08/01
- UL 508 STANDARD FOR INDUSTRIAL CONTROL EQUIPMENT - Edition 17 - Revision Date 2010/04/15.

Parameter	Symbol	Unit	Value
Primary involved potential		V AC/DC	600
Max surrounding air temperature	T_A	°C	85
Primary current	I_P	mA	0 to 10
Secondary supply voltage	U_C	V DC	± 12 to ± 15
Secondary nominal rms current	I_{SN}	mA	25

Conditions of acceptability

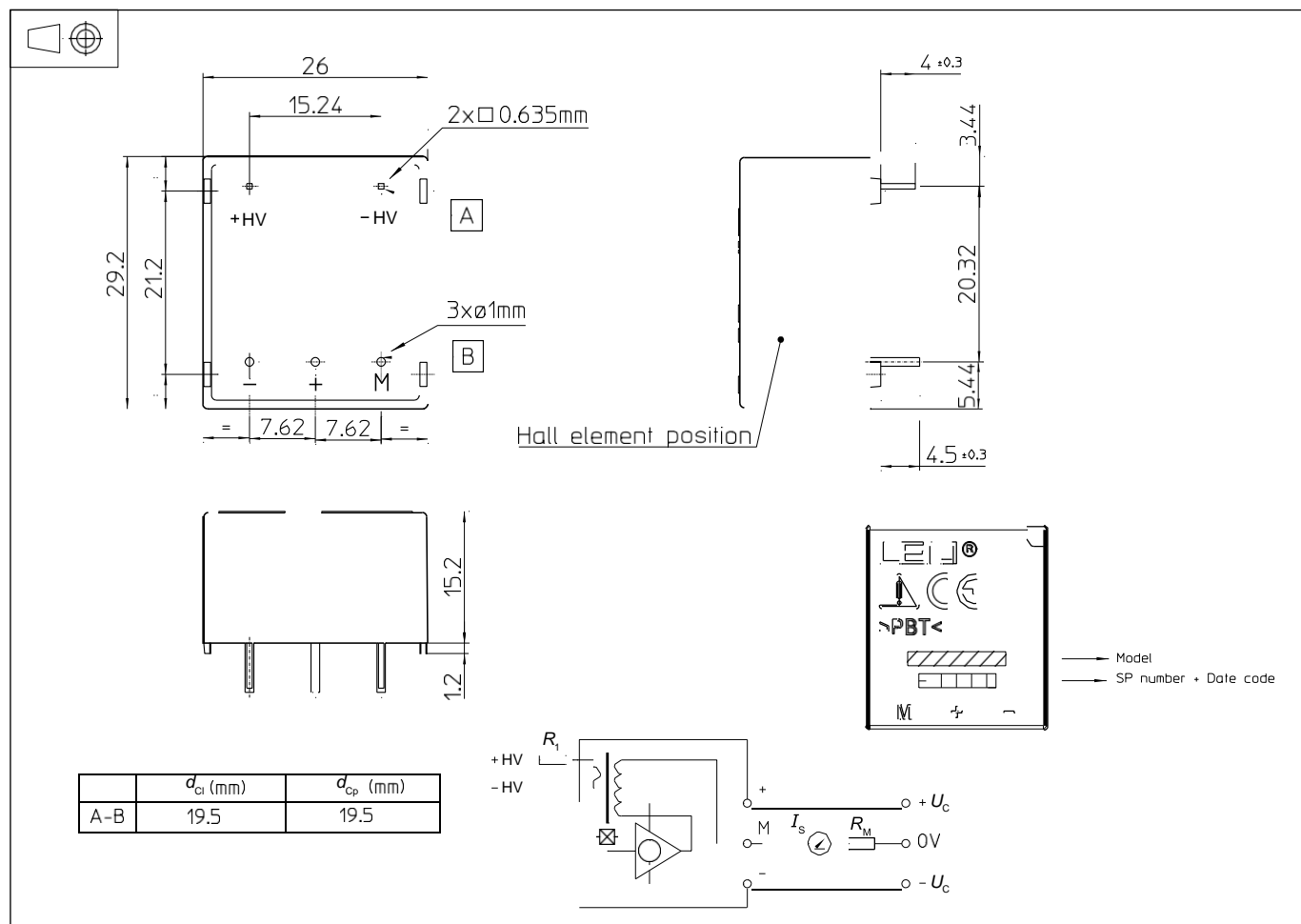
When installed in the end-use equipment, consideration shall be given to the following:

- 1 - These devices must be mounted in a suitable end-use enclosure.*
- 2 - The terminals have not been evaluated for field wiring.*
- 3 - The LV 25-P series are intended to be mounted on the printed wiring board of the end-use equipment (with a minimum CTI of 100).*
- 4 - The LV 25-P series shall be used in a pollution degree 2 environment when the Printed Wiring Board has not been coated.*
- 5 - The LV 25-P series shall be mounted on the load side of line filters.*
- 6 - Low voltage circuits are intended to be powered by a circuit derived from an isolating source (such as a transformer, optical isolator, limiting impedance or electro-mechanical relay) and having no direct connection back to the primary circuit (other than through the grounding means).*
- 7 - Base on results of temperature tests, in the end use application, a maximum of 100 °C cannot be exceeded at soldering point between primary coil pin and soldering point of on the primary bus bar (corrected to the appropriate evaluated max. surrounding air).*

Marking

Only those products bearing the UL or UR Mark should be considered to be Listed or Recognized and covered under UL's Follow-Up Service. Always look for the Mark on the product.

Dimensions LV 25-P (in mm)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 2 pins 0.635 x 0.635 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins $\varnothing 1$ mm
- Recommended PCB hole $\varnothing 1.2$ mm

Remarks

- I_s is positive when V_p is applied on terminal +HV.
- Installation of the transducer must be done unless otherwise specified on the datasheet, according to LEM Transducer Generic Mounting Rules. Please refer to LEM document N°ANE120504 available on our Web site: [Products/Product Documentation](#).
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

Instructions for use of the voltage transducer model LV 25-P

Primary resistor R_1 : the transducer's optimum accuracy is obtained at the nominal primary current. As far as possible, R_1 should be calculated so that the nominal voltage to be measured corresponds to a primary current of 10 mA.

Example: Voltage to be measured $V_{PN} = 250$ V

a) $R_1 = 25$ k Ω / 2.5 W, $I_p = 10$ mA Accuracy = ± 0.9 % of V_{PN} (@ $T_A = +25$ °C)

b) $R_1 = 50$ k Ω / 1.25 W, $I_p = 5$ mA Accuracy = ± 1.5 % of V_{PN} (@ $T_A = +25$ °C)

Operating range (recommended): taking into account the resistance of the primary windings (which must remain low compared to R_1 , in order to keep thermal deviation as low as possible) and the insulation, this transducer is suitable for measuring nominal voltages from 10 to 500 V.

5.8 ANEXO 8 Hoja de características de la DAQ NI USB-6210

NI USB-6210 16-Bit, 250 kS/s M Series Multifunction DAQ, Bus-Powered

- 16 analog inputs (16-bit, 250 kS/s)
- 4 digital inputs; 4 digital outputs; two 32-bit counters
- Bus-powered USB for high mobility; built-in signal connectivity
- NI signal streaming for sustained high-speed data streams over USB
- Compatibility with LabVIEW, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio for Visual Studio .NET
- NI-DAQmx driver software and LabVIEW SignalExpress LE interactive data-logging software



Overview

The NI USB-6210 is a bus-powered M Series multifunction data acquisition (DAQ) module for USB that is optimized for superior accuracy at fast sampling rates. It offers 16 analog inputs; a 250 kS/s single-channel sampling rate; four digital input lines; four digital output lines; four programmable input ranges (± 0.2 to ± 10 V) per channel; digital triggering; and two counter/timers.

The USB-6210 is designed specifically for mobile or space-constrained applications. Plug-and-play installation minimizes configuration and setup time, while direct screw-terminal connectivity keeps costs down and simplifies signal connections. This product does not require external power.

This module also features the new NI signal streaming technology, which gives you DMA-like bidirectional high-speed streaming of data across USB. For more information about NI signal streaming, view the Resources tab.

Bus-powered M Series devices for USB are available in OEM versions. Check the Resources tab or use the left navigation to get pricing and technical information.

Driver Software

NI-DAQmx driver and measurement services software provides easy-to-use configuration and programming interfaces with features such as the DAQ Assistant to help reduce development time. Browse the information in the Resources tab to learn more about driver software or download a driver. M Series devices are not compatible with the Traditional NI-DAQ (Legacy) driver.

Application Software

Every M Series DAQ device includes a copy of NI LabVIEW SignalExpress LE data-logging software, so you can quickly acquire, analyze, and present data without programming. In addition to LabVIEW SignalExpress, M Series DAQ devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software: LabVIEW 7.1, LabWindows/CVI 7.x, or Measurement Studio 7.x. M Series DAQ devices are also compatible with Visual Studio .NET, C/C++, and Visual Basic 6.0.

The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries.

Specifications

Specifications Documents

- Specifications (2)
- Data Sheet

Specifications Summary

General	
Product Name	USB-6210
Product Family	Multifunction Data Acquisition
Form Factor	USB
Part Number	780103-01 , 779675-01
Operating System/Target	Linux , Mac OS , Windows
DAQ Product Family	M Series
Measurement Type	Voltage
Isolation Type	None
RoHS Compliant	Yes
USB Power	Bus-Powered
Analog Input	
Channels	16 , 8
Single-Ended Channels	16
Differential Channels	8
Resolution	16 bits
Sample Rate	250 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	2.69 mV
Maximum Voltage Range Sensitivity	91.6 μ V
Minimum Voltage Range	-200 mV , 200 mV
Minimum Voltage Range Accuracy	0.088 mV
Minimum Voltage Range Sensitivity	4.8 μ V
Number of Ranges	4
Simultaneous Sampling	No

On-Board Memory 4095 samples

Analog Output

Channels 0

Digital I/O

Bidirectional Channels 0

Input-Only Channels 4

Output-Only Channels 4

Timing Software

Logic Levels TTL

Input Current Flow Sinking , Sourcing

Output Current Flow Sinking , Sourcing

Programmable Input Filters No

Supports Programmable Power-Up States? Yes

Current Drive Single 16 mA

Current Drive All 50 mA

Watchdog Timer No

Supports Handshaking I/O? No

Supports Pattern I/O? No

Maximum Input Range 0 V , 5.25 V

Maximum Output Range 0 V , 3.8 V

Counter/Timers

Counters 2

Buffered Operations Yes

Debouncing/Glitch Removal Yes

GPS Synchronization No

Maximum Range 0 V , 5.25 V

Max Source Frequency 80 MHz

Pulse Generation Yes

Resolution 32 bits

Timebase Stability 50 ppm

Physical Specifications

Length	16.9 cm
Width	9.4 cm
Height	3.1 cm
I/O Connector	Screw terminals

Timing/Triggering/Synchronization

Triggering	Digital
------------	---------

Services

Extended Warranties

National Instruments designs and manufactures all products to minimize failures, however unexpected failures can still occur. Extended warranties provide a fixed economical price at the time of system purchase, covering any repair costs for up to three years. In addition, they offer the following benefits:

- Significant cost savings compared to individual repair incidents
- Fault location, diagnostics, and repair by NI any time the system product fails
- All parts and labor costs covered as well as any adjustments needed to restore the hardware to manufacturing specifications

For more information about your warranty options:

- Learn More About Warranty Services [<http://www.ni.com/services/warranty.htm>]
- Talk to an Expert About Extended Warranties [[javascript:openCallMeWindowCTA\(document.referrer,%20'US'\)](http://www.ni.com/services/warranty.htm)]
- View Warranty Repair Policies [http://www.ni.com/services/warranty_repair_policies.htm]

Calibration

NI recognizes the need to maintain properly calibrated devices for high-accuracy measurements. NI provides manual calibration procedures, services to recalibrate your products, and automated calibration software to calibrate many NI measurement products.

- Learn More About Calibration Services [<http://www.ni.com/services/calibration.htm>]

Training

NI training is the fastest, most certain route to productivity with NI tools and successful application development.

- Learn More About NI Training and Certification [<http://www.ni.com/training/>]
- Find a Course Near You and View Schedules [<http://sine.ni.com/tacs/app/tp/p/ap/ov/pg/1/>]

Repair Services

Return your registered product under warranty at no additional labor and parts cost. NI offers fault location, diagnostics, and repair any time the system fails as well as any adjustments needed to restore the hardware to manufacturing specifications.

- Learn More About Repair Services [<http://www.ni.com/services/warranty.htm>]
- Contact NI to obtain a Return Material Authorization (RMA) form and shipping instructions. [http://sine.ni.com/apps/utf8/nicc.call_me]
- View your RMA support request status online. [<https://sine.ni.com/srm/app/myServiceRequests>]

- Register your product [<http://www.ni.com/register>] .

Technical Support

[ni.com/support](http://www.ni.com/support) [<http://www.ni.com/support/>]

Resources

Additional Product Information

- Manuals (8)
- Dimensional Drawings (2)
- Product Certifications

Related Information

- NI USB Data Acquisition for OEM
- Download NI Data Acquisition Drivers
- NI LabVIEW SignalExpress Interactive Data-Logging Software
- NI Signal Streaming: Bidirectional High-Speed Data Streams over USB

© 2012 National Instruments Corporation. All rights reserved.